

平成 28 年度 修士論文

通信速度変動を考慮した
消費電力推定モデル
及び省電力映像配信システムの提案

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 情報理工・情報通信専攻

5115F041 - 4

竹中 幸子

指導 甲藤 二郎 教授

2017 年 1 月 30 日

指導教授印	受付印

目次

第 1 章	序論	4
1.1	はじめに	4
1.2	研究目的	4
1.3	本論文の構成	5
第 2 章	無線通信技術	6
2.1	W-CDMA	6
2.2	LTE	8
2.2.1	LTE 無線アクセス技術の特徴	8
2.2.2	ハンドオーバ	10
2.2.3	LTE 通信時の状態遷移	12
2.3	IMT-Advanced	14
2.4	無線 LAN	15
2.4.1	標準化規格	15
2.4.2	CSMA/CA	15
2.5	次世代通信技術	18
2.5.1	5G	18
2.5.2	IEEE 802.11ax	19
2.5.3	オフローディング	19
第 3 章	ビデオストリーミング	21
3.1	ビデオストリーミングの課題	21
3.2	ビデオストリーミングプロトコル	21
3.2.1	RTP	21
3.2.2	RTCP	22
3.3	HTTP/RTSP ストリーミング	22
3.4	MPEG-DASH	23
3.4.1	MPD	24
3.4.2	DASH-JS	25
3.5	ビデオストリーミングにおける再生バッファ制御	25
3.5.1	バッファリング戦略	25
3.5.2	Wi-Fi 及び LTE 使用時の映像配信における消費電力	27
第 4 章	映像配信における消費電力推定モデル	28

4.1	映像配信における 4 状態	28
4.2	映像配信における消費電力推定モデルの提案	29
4.3	提案モデルの検証	32
4.3.1	スループット導出方法.....	33
4.3.2	消費電力導出方法	35
4.3.3	評価環境及び評価方法.....	39
4.3.4	シナリオ.....	42
4.3.5	評価結果.....	43
第 5 章	省電力映像配信システム	54
5.1	コンセプト	54
5.1.1	スループット vs 消費電力	54
5.1.2	バッファ vs 消費電力.....	54
5.1.3	再生中断時間の抑制	57
5.2	提案システム概要	57
5.3	スループット履歴の収集	58
5.3.1	スループット履歴収集アプリケーション	58
5.3.2	対象エリア	59
5.4	無線ネットワーク品質マップの作成	59
5.5	経路探索.....	60
5.6	バッファ制御.....	64
5.7	提案バッファ制御における省電力効果推定モデル	65
第 6 章	提案システムの評価.....	69
6.1	シミュレーション及び研究室内実験	69
6.1.1	評価環境.....	69
6.1.2	評価シナリオ	71
6.1.3	評価結果.....	71
6.2	フィールド実験.....	78
6.2.1	評価環境及び方法	78
6.2.2	評価シナリオ	79
6.2.3	評価結果.....	80
第 7 章	総括	84
7.1	まとめ	84
7.2	今後の展望	84
	謝辞	85

参考文献	86
発表文献リスト	89

第1章 序論

1.1 はじめに

スマートフォン端末の普及により、モバイル通信トラフィックは 2015 年から 2020 年までに約 5 倍に増加するとシスコシステムズが予測している[1]。そのうちの 75%は映像コンテンツが占めると言われ、YouTube[2]や Netflix[3]、Hulu[4]等の動画共有サービスでは、4K コンテンツが配信される等の更なる拡大が進んでいる。一方で、スマートフォン端末ユーザは、バッテリーの持ちに関し大きな不満を抱いている[5]。スマートフォンの処理能力の向上と 4K/8K のような解像度の高いコンテンツの視聴機会増加により、この不満はさらに深刻化することが考えられる。

加えて、モバイル端末はスマートフォンのみならず、移動中にデータのストリーム転送を行うウェアラブル端末も注目されている[6]。今後、さらに拡大するストリーム転送サービスをより快適にするために、モバイル端末における無線規格・無線リソースの有効利用が重要となる[7]。

1.2 研究目的

快適な映像配信を実現するために、快適経路[8]やペーシングアルゴリズム[9][10]が提案されている。快適経路は、モバイルユーザを通信品質の良い Wi-Fi スポットを経由して目的地まで移動させ、受信データ量が最大となる経路を提示するシステムである。また、[9]ではスループットの確率的拡散予測に基づきバッファを制御するペーシング方式、[10]では過去のスループット情報に基づくペーシングアルゴリズムを提案している。しかしながら、これら[9][10]で提案されているペーシングアルゴリズムは、映像の再生停止回数の抑制や再生映像のレート向上を目標としており、消費電力に関する検討はなされていない。

また、映像配信時の消費電力に関する研究が数多くなされている[11]。[12]や[13]では、無線ネットワーク環境下における映像配信時の消費電力分析を行っている。これらの研究から、伝送路や電波強度が端末の消費電力に強く影響を与えること[12]、WCDMA における YouTube コンテンツ視聴が WLAN における視聴と比較し、電力を大きく消費すること[13]が確認される。さらに、クライアント端末のバッファ制御を活用した Wi-Fi インターフェースの適応制御方式が[14][15][16]により提案されている。これに対し[17]では、Wi-Fi 環境においてバッファ容量を増大することにより映像配信が省電力となることを確認している。ところで、モバイルユーザに対し、省電力、加えて高信頼な映像配信を実現するた

めには、通信速度変動を考慮することが重要である。しかし、ここで示した研究において通信速度変動は考慮されていない。

そこで本研究では、まず、スマートフォンにより収集したスループット履歴や予測技術を用いて導出した通信速度変動を基に、映像配信時の消費電力を推定するモデルを提案する。提案モデルに対し、本モデルから導出される推定値と実測値の比較による妥当性の評価、及びスループット予測技術を取り入れた応用例を示す。次に、目的地まで移動するユーザに対し、経路探索及びバッファ制御を活用した省電力、加えて高信頼な映像配信を実現するシステムを提案する。本システムに対し、シミュレーション・実機実験による有効性の確認を行う。

1.3 本論文の構成

本論文は、7章で構成されている。第1章では、研究背景および本研究の目的について述べた。第2章では、無線通信技術について述べる。第3章では、ビデオストリーミング技術について述べる。第4章では、映像配信時の消費電力を推定する提案モデルについて述べる。第5章では、モバイルユーザに対し省電力、加えて高信頼な映像配信を実現する提案システムについて述べ、第6章ではその有効性を示すためのシミュレーション評価及び実機実験評価について述べる。そして、第7章で総括を行い、まとめを述べる。

第2章 無線通信技術

スマートフォンやその他モバイル端末が盛んに使用される現在、用いられる無線通信技術は多様なものとなった。その中でも本章では、モバイル端末により用いられる Wideband Code Division Multiple Access (以下、W-CDMA)、Long Term Evolution (以下、LTE)、LTE -Advanced、無線 LAN 及び次世代通信技術として 5G、オフローディング、IEEE802.11ax について記す。

2.1 W-CDMA

[18]では、現在のモバイルネットワークの代表である LTE の一世代前の技術 W-CDMA を取り上げている。W-CDMA は、複数のユーザが存在する場合に各ユーザの信号を多重化するマルチプルアクセス技術の 1 つである Code Division Multiple Access (以下、CDMA) の利点を生かしたものである。CDMA は、ユーザやチャネルごとに拡散符号を掛け合わせ、信号を足し合わせることで、受信側で同様の拡散符号を用いて自身の信号を取り出すことを可能とする。マルチプルアクセス技術は、CDMA の他に Frequency Division Multiple Access (以下、FDMA)、Time Division Multiple Access (以下、TDMA)が存在する。まず、これら 2 つの技術と CDMA を表 2.1.1 において比較することにより、その特徴、利点、欠点を示す。さらに、CDMA の方式的・技術的利点を下記にまとめる。

- A) 高い周波数利用効率
- B) システム容量の有効利用：伝送路にデータのない時間に送信電力を低減する
- C) 柔軟なシステムの実現
- D) 全てのセルにおける同一周波数の利用
- E) 遅延多重派フェージングに対する強い耐性
- F) ソフトハンドオーバー実現による安定した接続
- G) 詳細な電力制御による電力の最小限化
- H) 電波伝搬遅延時間の計測による端末の位置特定の実現

上記 A)～H)に示す CDMA の利点を拡張した W-CDMA の技術的特徴を下記に示す。

- (ア) 非同期動作：基地局間の動作を同期することなく運用することができる
- (イ) 高速送信電力制御：高頻度な送信電力制御により受信レベル、干渉レベルに対する素早い対応が可能となる
- (ウ) OVSF 符号による異なる速度のチャネルの多重化
- (エ) 2 種類の誤り訂正符号：ターボ符号化と畳み込み符号化の使い分けによりエラーレートの改善が実現した
- (オ) 送信ダイバーシチ

表 2.1.1 マルチプルアクセス技術の概要[19]

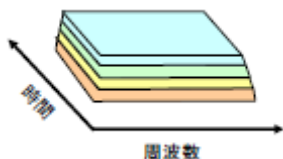
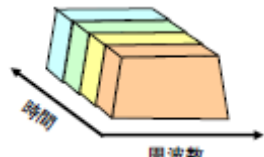
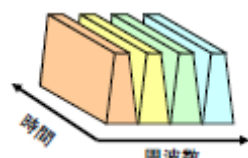
	多重化方法	長所	短所
① CDMA	符号 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 容易なハンドオーバー ・ 隣接ゾーンの同一周波数利用 ・ 周波数選択性フェージングへの強い耐性 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 装置がやや複雑な点 ・ 送信電力制御の必要性あり
② FDMA	周波数 	<ul style="list-style-type: none"> ・ チャネル間非同期 ・ アナログ伝送可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ チャネル数が多い時、送信波間の混変調が発生 ・ 送信アンテナ共用器の損失増加 ・ 高い周波数暗転度の必要性あり
③ TDMA	時間 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高い周波数安定度を要求しない ・ 基地局において少ない送信機で実現可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 送信波バースト的でピーク電力が大きい ・ 複数基地局間で同期が必要

表 2.1.2 W-CDMA により実現される品質や諸元[20]

拡散帯域幅	5 MHz	レイク受信機の数	実装の規定なし
符号速度	3.84 Mcps	拡散符号化系列 (下り)	①スクランブリング・コード(基地局の選別)
音声符号化方式	AMR(1.95 k~12.2 kbps)		②チャネライゼーション・コード(端末の選別)
最大通信速度 (回線交換)	64 kbps xN	拡散符号化系列 (上り)	①スクランブリング・コード(端末の選別)
最大通信速度 (パケット交換) [上り/下り]	2 Mbps/2 Mbps		②チャネライゼーション・コード(高速データ通信時に使用)
デュプレックス	FDD	基地局間同期	同期/非同期
フレーム長	10, 20, 40, 80 msec	周波数利用効率	PDC の 2 倍程度
1 次変調	QPSK/BPSK	1MHz 当たりの加入者容量	40 万~50 万加入
2 次変調	QPSK/HPSK		

(カ) 柔軟性のある信号処理：トランスポートチャネルや物理層チャネルを分離する
最後に、W-CDMA により実現される品質や諸元を表 2.1.2 にまとめる。

2.2 LTE

LTE は、Long Term Evolution の略称である。3G と呼ばれる第 3 世代の W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access)や CDMA2000 (Code Division Multiple Access 2000)と IMT-Advanced と呼ばれる 4G つまり第 4 世代の間に開発された第 3.9 世代の規格である。表 2.2.1 に LTE の特徴を第 3 世代である W-CDMA と比較することでまとめる。

表 2.2.1 LTE と W-CDMA の比較 [21]

	W-CDMA	LTE
最大通信速度	下り：14.4 Mbps	下り：326.4 Mbps
	上り：5.76 Mbps	上り：864 Mbps
遅延時間(目標値)	なし	接続遅延：100 ms
		伝送遅延(無線ネットワーク内片道)：5 msec
周波数利用効率	下り：1 倍	下り：3 倍以上
	上り：1 倍	上り：2 倍以上
周波数帯域幅	5 MHz 固定	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz 可変
通信方式	回線交換方式	パケット交換方式
	パケット交換方式	

2.2.1 LTE 無線アクセス技術の特徴

LTE では、下記のような無線アクセス技術の特徴から、第 3 世代以上の通信品質を実現している[18]。

A) 柔軟なシステム帯域幅

第 3 世代である W-CDMA の伝送帯域幅は、5 MHz のみであったが、LTE では 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz、20 MHz の 6 つの帯域幅を使用しており、柔軟なシステムの展開が可能になった。

B) FDD と TDD の調和コンセプト

LTE では、Frequency Division Duplexing (以下、FDD：周波数分割複信)と Time Division Duplexing (以下、TDD：時間分割複信)間で同一の無線アクセス方式を利用することで、最大限の共通性を確保している。これに加えて、半二重 FDD の運用も可能となり、

上り/下りリンク信号の分離が容易となったため、端末構成が簡易になった。FDD と TDD の調和コンセプトを図 2.2.1 に示す。

ここで、上に記載した FDD と TDD に関し簡単に記述する。複信とは、1 ユーザにおいて上りと下りの伝送を同時に実現する技術である。FDD とは、上りと下りの伝送を異なる周波数を用いて行う方式であり、TDD とは、同一周波数を用いて上りと下りの伝送タイミングをずらして通信する方式である。

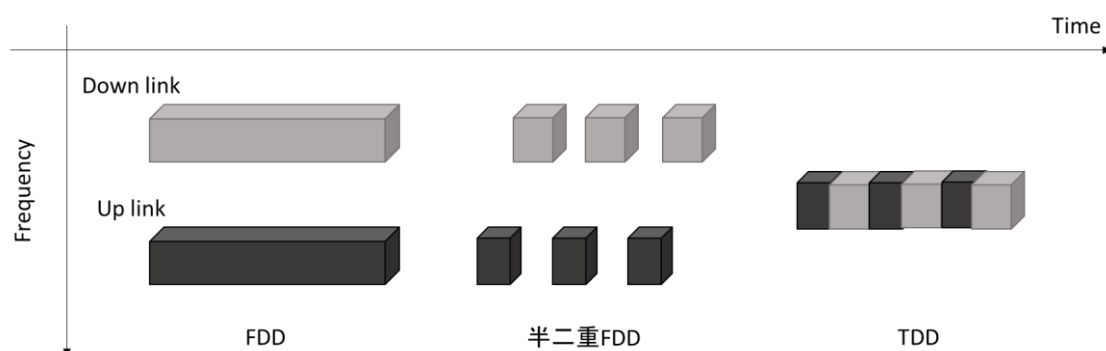


図 2.2.1 FDD と TDD の調和コンセプト[18]

C) 下りリンク無線アクセスに適応型 OFDM を採用

適応型 OFDM とは、遅延波に強く、優れたフェージング特性を持ち、Multi-Input Multi-Output (以下、MIMO)との親和性の良い Orthogonal Frequency Division Multiplexing (以下、OFDM)を拡張した技術である。適応型 OFDM では、図 2.2.2 に示す

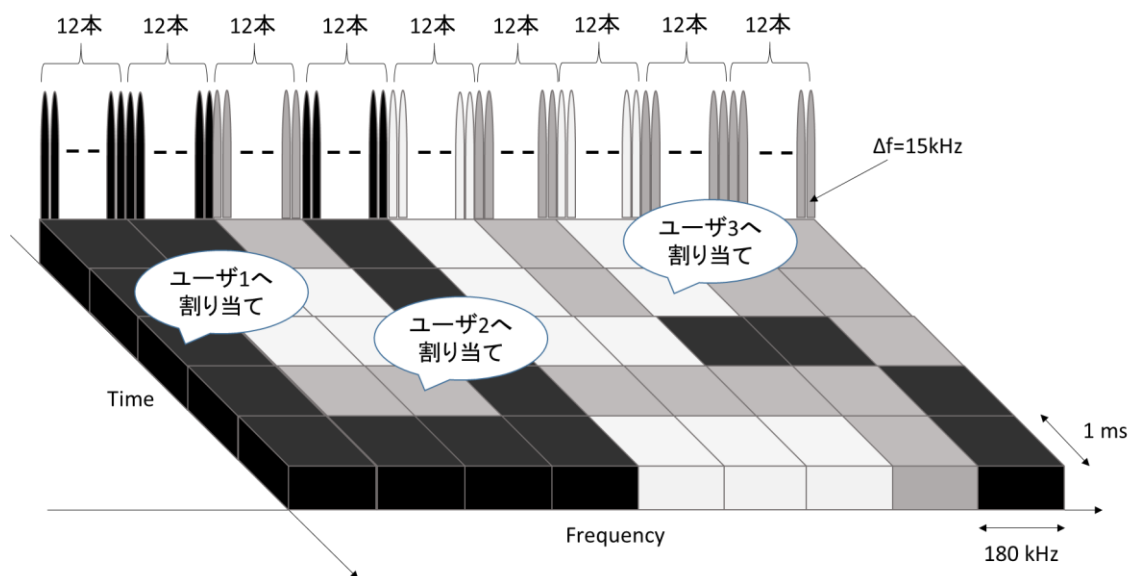


図 2.2.2 適応型 OFDM のコンセプト[18]

ように基地局内のスケジューラが各ユーザの通信状況に適した無線リソースが割り当てる。無線リソースは、リソース・ブロック単位で各ユーザに割り当てる。これにより、全てのユーザ間で、無線リソースの効率的な利用が可能となる。さらに、割り当てられた無線リソースにおいても、変調方式や符号化率、MIMO レイヤ数を通信状況に適応させ、更なる無線リソースの利用効率向上を実現する。

D) 上りリンク無線アクセスに、動的な帯域割り当てによる SC-FDMA を採用

Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (以下、SC-FDMA)は、端末の高出力電力増幅器の電力効率、カバレッジ確保に有利なシングルキャリアベースの無線アクセス方式である。本無線アクセスでは、セル内で上り通信が行われる際に、信号間で起こる相互干渉を防ぐことが可能である。さらに、伝送帯域を伝送時間間隔ごとに適宜変更することによって、多様な伝送速度に対応することができる。

E) 高度なマルチアンテナ技術の採用

LTE で用いられるマルチアンテナ技術として、MIMO、ビームフォーミング、送信ダイバーシチ等が挙げられる。これらの技術を利用環境、目的に応じて使用することで、高ビットレート及び大容量化を実現する。

2.2.2 ハンドオーバー

ハンドオーバー[22]とは、端末が通信中に別のセルに移動した際に接続する基地局を自動的に切り替えることである。基地局では、接続している端末の情報やデータの送受信の経過等、様々な情報を保持しており、ハンドオーバーが行われる際には、これらの情報を基地局間で受け渡さなければならない。

LTE におけるハンドオーバーには 2 種類の方式が定義されている。1 つ目は、X2 ハンドオーバー、2 つ目は S1 ハンドオーバーである。以降、これらのハンドオーバーに関し、記述する。

A) X2 ハンドオーバー

X2 ハンドオーバーでは、移動元の基地局と移動先の基地局が、X2 インターフェースにより直接接続される端末の情報のやり取りをする。X2 ハンドオーバーにおけるシーケンス例を図 2.2.3 に示す。

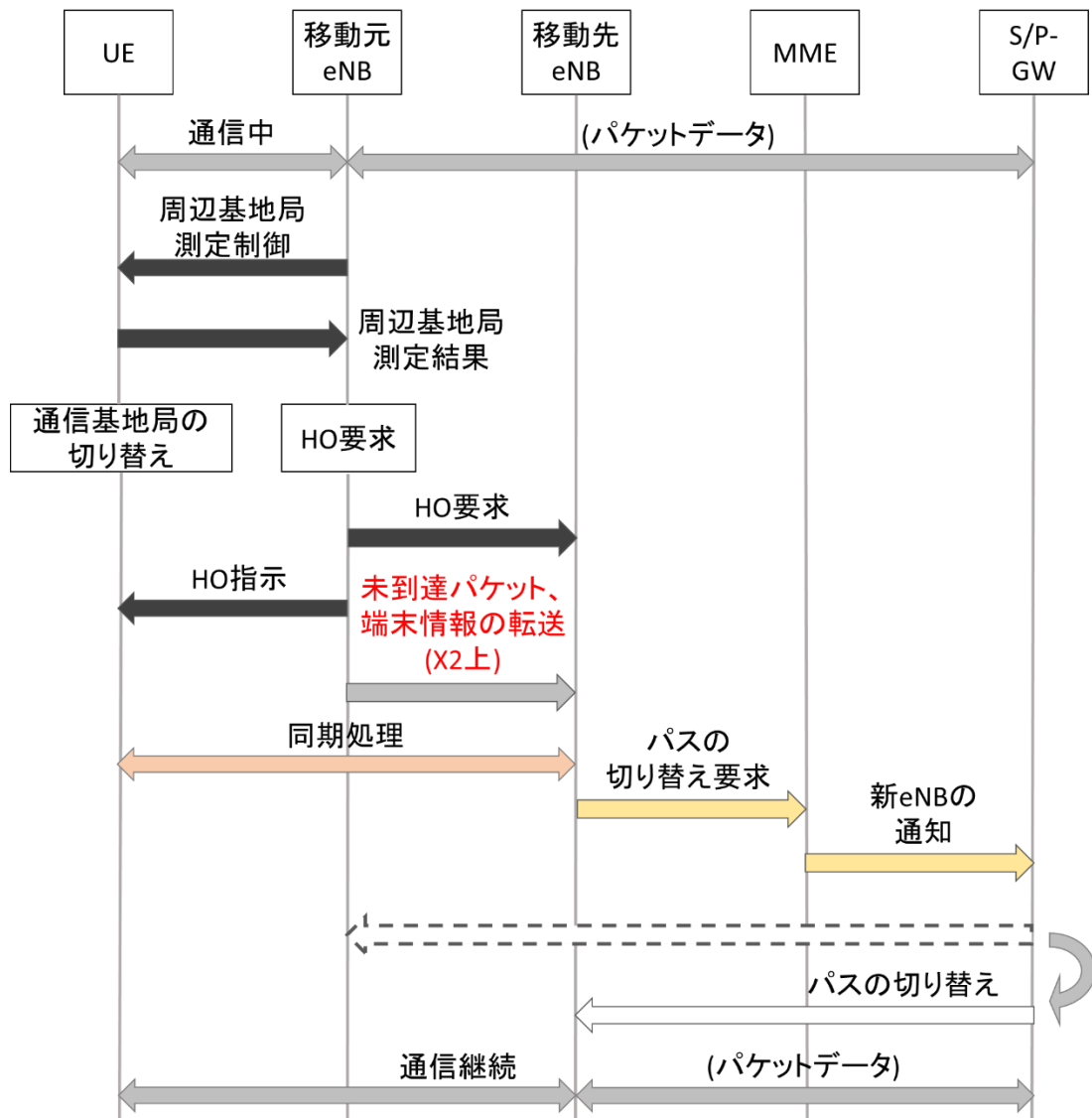


図 2.2.3 X2 ハンドオーバーにおけるシーケンス例[22]

図 2.2.3 に示す通り、X2 ハンドオーバーでは、接続される端末情報のやり取りを移動元基地局と移動先基地局が直接行うので、コアネットワークの処理が少なく、接続変更時間が短縮されることが特徴である。しかし、X2 ハンドオーバーを行うには、移動元、移動先基地局が同一の Mobility Management Entity (以下、MME) と呼ばれるネットワークの制御を行うコントロールプレーンの働きをするアクセスゲートウェイに接続されていなくてはならない。従って、異なる MME に接続される基地局間では、X2 ハンドオーバーを使用することができない。

B) S1 ハンドオーバー

S1 ハンドオーバーは、X2 ハンドオーバーが使用できない、または異なる MME に接続され

る基地局間で利用される。S1 ハンドオーバーにおけるシーケンス例を図 2.2.4 に示す。

図 2.2.4 に示す通り、S1 ハンドオーバーでは移動元基地局と移動先基地局間でやり取りをせず、そのさらにコアにある基地局の制御を行う Radio Network Controller(RNC)同士や、ユーザデータのユーザプレーンや外部のインターネット、企業のイントラネットに接続するゲートウェイの働きをする Serving / Packet data network Gateway (S/P-GW)がやり取りを行うことで完了する。

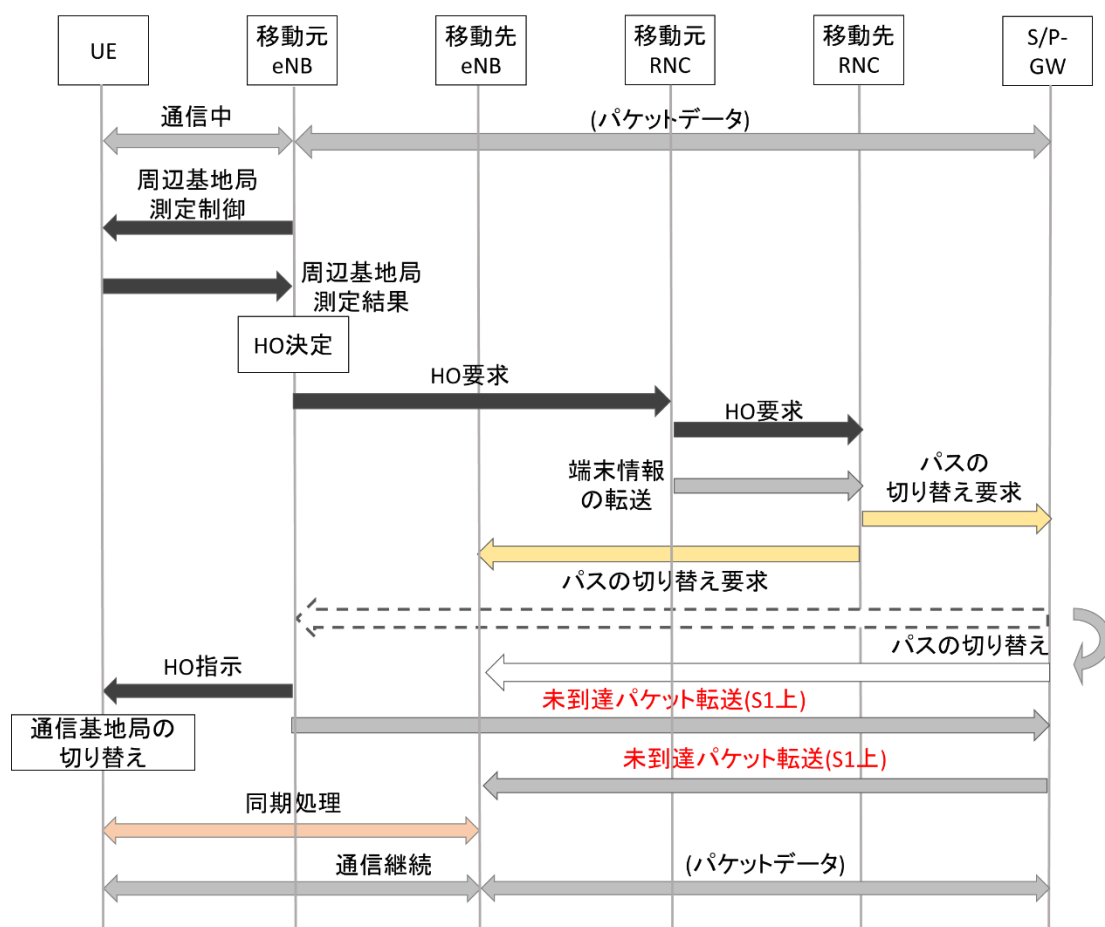


図 2.2.4 S1 ハンドオーバーにおけるシーケンス例[22]

2.2.3 LTE 通信時の状態遷移

User Experience (以下、UE : ユーザ端末)において LTE を介し通信を行う場合、その状態は大きく RRC_CONNECTED、RRC_IDLE に分類される[23]。RRC_CONNECTED 状態には、さらに Continuous Reception、Short Discontinuous Reception (以下、DRX)、

Long DRX の 3 状態が存在し、RRC_IDLE 状態には DRX の 1 状態が存在する。図 2.2.5 に示す LTE 通信時の状態遷移図を基に、これら状態に関し記述する。

- ① RRC_IDLE : LTE による通信が行われる前、UE は本状態を維持する。UE がパケットを受信した後、RRC_CONNECTED 内の Continuous Reception 状態に遷移する。遷移する際に Radio Resource を割り当てるため、遅延が生じる。
 - ② RRC_CONNECTED
 - Continuous Reception : UE が本状態に遷移すると Physical Downlink Control Channel (PDCCH) と呼ばれる制御メッセージを読み込む。本メッセージは基地局から UE に送信される。また、パケットの受信のない状態が一定時間 T_i 継続した場合、UE は Short DRX 状態に遷移する。
 - Short/Long DRX : 本状態は高品質且つ省電力な通信を実現するために用いられるアルゴリズム(図 2.2.6)である。DRX 状態は、UE が PDCCH を待っている時間 On Duration と消費電力を抑えるための待機時間を含んでいる。従って On Duration が固定値の場合、Short DRX と比較して Long DRX の方が、待機時間が大きいため、遅延が大きくなるのと引き換えに、その分省電力になる。一方で Short DRX は、消費電力が大きくなるのと引き換えに遅延が小さくなる。
- Continuous Reception から Short DRX に遷移した後、Short Cycle Timer がカウントを開始する。その後、特定の時間が経過し、データの送受信がない場合 Long DRX に遷移する。一方で、データの送受信がある場合、Continuous Reception に遷移する。再度送受信が開始し、Continuous Reception に遷移すると Tail timer がカウントを開始する。パケットの送受信がある度に、この値はリセットされ特定の時間が経過すると Radio Resource を開放し、RRC_IDLE 状態へ遷移する。

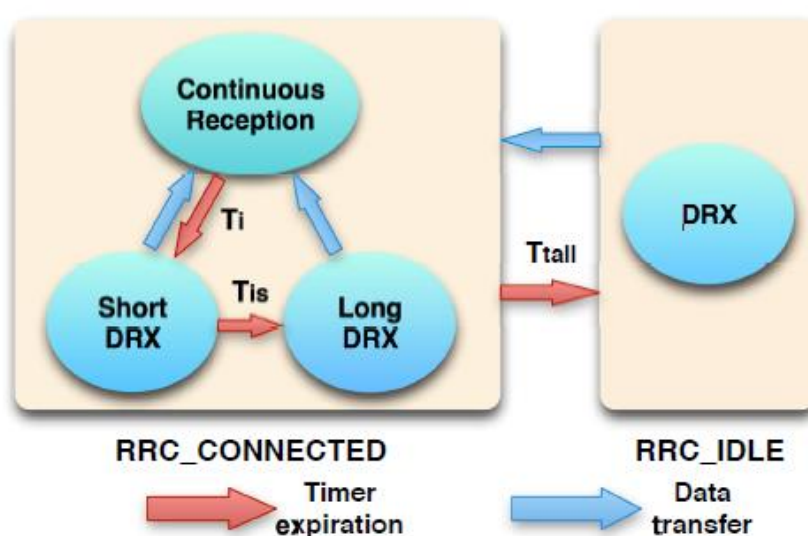


図 2.2.5 LTE 通信時の状態遷移図[23]

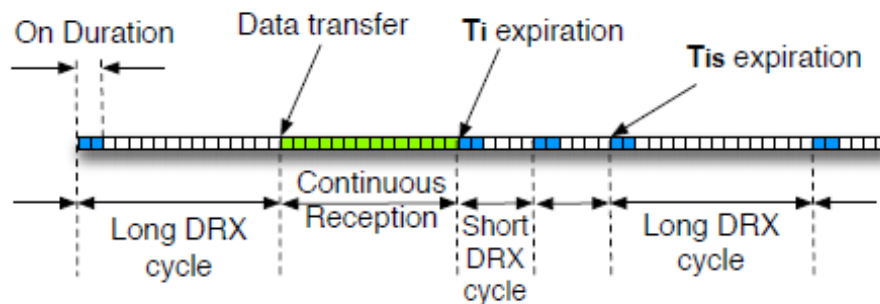


図 2.2.6 DRX アルゴリズム[23]

2.3 IMT-Advanced

International Mobile Telecommunications – Advanced (以下、IMT-Advanced) [18]は、LTE 以上の高速化・広帯域化を目指し、100 MHz 帯域使用時に下り最大 1 Gbps、上り最大 300 Mbps の通信速度実現を想定する第 4 世代の無線アクセス技術である。対象端末はスマートフォンのみならず、特定のマクロなセル内でスポット的に配置、または屋内での利用が想定される。このような利用・要求条件を満たすべく 3GPP により定義された規格が、LTE-Advanced [18]である。下記に LTE-Advanced 主要技術を示す。

A) マルチアンテナ能力の開発

上りリンクにおいて、LTE では実現されていない MIMO 技術を実現する。さらに、下りリンクにおいて、LTE の最大 4 レイヤ空間多重を超える最大 8 レイヤ空間多重を実現する。

B) キャリア/スペクトル・アグリゲーション

キャリア・アグリゲーションとは、コンポーネント・キャリア（通常は、20 MHz の帯域）を複数集めることにより帯域幅を拡張する技術である。LTE-Advanced の使用が可能な端末では、複数のキャリアを並列に送受信することによって、広帯域伝送を実現することができる。さらに LTE-Advanced では、スペクトル・アグリゲーションと呼ばれる、周波数的に不連続、且つ異なる周波数帯域に存在するコンポーネント・キャリアのアグリゲーションも取り入れられている。これにより、連続した周波数スペクトルが確保できない場合でも広帯域伝送が可能となる。

C) 多地点協調送受信

多地点協調送受信は、異なるセル間での送受信のダイナミックな調整を行う技術です。例えば、異なるセル間でスケジューリングをダイナミックに調整する ICIC や、上りリンクにおいて複数のセルで受信された信号をセル間で通信しながら結合処理（Joint

Processing)をする方式、下りリンクにおいて複数のセルから同一ユーザへの結合処理 (Joint Transmission)をする方式がある。

本技術の主な目的は、セル間干渉の低減、受信信号強度の改善であり、セル端ユーザのシステムの性能、サービス品質の向上が見込める。

D) リレー(中継)機能

リレー機能とは、端末からのあるいは端末へ信号を転送するリレーノードを導入する技術である。本技術により、セル・カバレッジ・エリアの拡張やカバレッジ内でデータ伝送速度の高速化を実現することができる。

2.4 無線 LAN

LAN とは、Local Area Network の略称で、家庭やオフィス、その他施設内の比較的小さなネットワークを指す。本ネットワークを無線により実現したものを無線 LAN という。Wi-Fi は、無線 LAN を IEEE 802.11 規格に従い構築したものを指す。そこで本章では、無線 LAN の標準化規格を記述する。加えて、Local Area Network 内で複数のユーザが無線リソースを共有して利用する方式、多重アクセス Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance (以下、CSMA/CA)に関する記述も行う。

2.4.1 標準化規格

無線 LAN 技術を実現するため IEEE が標準化を行った規格一覧を表 2.4.1 に示す [24][25][26]。表 2.4.1 において、各規格の使用周波数帯やチャンネル幅、アンテナ数、変調方式、最大伝送速度を記すことにより、その特徴を明らかにする。

2.4.2 CSMA/CA

Local Area Network 内で複数のユーザが無線リソースを共有して利用する方式、多重アクセス方式には、2.1 章で示した FDMA、TDMA、CDMA の他に、キャリア感知多重アクセスと言われる Carrier Sense Multiple Access (CSMA)が広く利用されている。本方式では、通信開始前の待機中の端末が、他無線端末の電波が存在するが否かを検知した後、通信を開始する方式である。その中で、最も普及している方式が CSMA/CA [27]である。CSMA/CA は、CSMA に衝突回避機能を付加した技術である。

表 2.4.1 無線 LAN 標準化規格一覧[24][25][26]

企画名	使用周波数帯	チャネル幅	アンテナ数	変調方式	最大伝送速度
IEEE 802.11b	2.4GHz	22MHz	1×1	DSSS	11Mbps/22Mbps
IEEE 802.11a	5GHz	20MHz	1×1	OFDM	54Mbps
IEEE 802.11g	2.4GHz	20MHz	1×1	DSSS/OFDM	54Mbps
IEEE 802.11n	2.4GHz / 5GHz	20MHz	1×1	OFDM (サブキャリアの変調方式 : 64QAM)	72.2Mbps
			2×2		144.4Mbps
			3×3		261.7Mbps
			4×4		288.9Mbps
		40MHz	1×1		150Mbps
			2×2		300Mbps
			3×3		450Mbps
			4×4		600Mbps
IEEE 802.11ac	5GHz	80MHz	1×1	OFDM (サブキャリアの変調方式 : 256QAM)	433Mbps
			2×2		867Mbps
			3×3		1.3Gbps
			4×4		1.73Gbps
		160MHz	1×1		867Mbps
			2×2		1.73Gbps
			3×3		2.6Gbps
			4×4		3.47Gbps

CSMA/CA の仕組みを図 2.4.1 に示す。図 2.4.1 の様に、まずユーザ A が送信を開始するとその他ユーザは空中の信号を感知 (以降、キャリアセンス) し、待機する。キャリアセンスをした結果、他ユーザの信号を確認した場合、Inter Frame Space (以降、IFS : フレームとフレーム間の時間間隔) と呼ばれる一定期間待機し、その後、他ユーザの電波が検出されなかった場合、ランダム時間待機した上で、ユーザ B、C は送信フレームを送信する。この場合、ユーザ B、C 間ではランダム時間の短い端末が優先されて通信が開始される。

さらに IFS には、主に 4 つの長さが定義されており、ユーザ間の優先権を制御することができる。1 つ目は、最も優先権の高い送出信号間隔である Short IFS (以降、SIFS : 短フレーム間隔)、2 つ目は、次に送出信号間隔が短く優先権の高い PCF IFS (以降、PIFS : ポーピング用フレーム間隔)、3 つ目は、送信信号間隔が長く優先権の低い DCF IFS (以降、DIFS : 分散制御用フレーム間隔) である。さらに 4 つ目として、Expand IFS (以降、EIFS : 拡張フレーム間隔) が存在する。これら IFS の特徴を簡潔に下記に記述する。

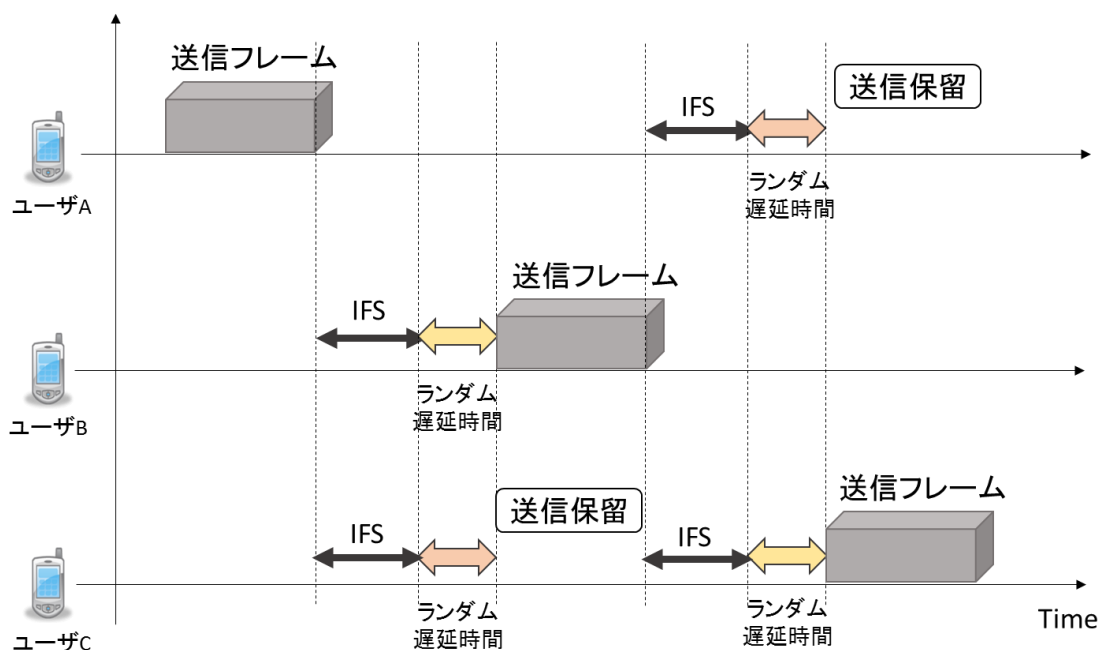


図 2.4.1 CSMA/CA の仕組み[27]

① SIFS

802.11 規格で定義されるフレーム間隔の中で最小のフレーム間隔である。利用ケースとして、データ・フレームに対する ACK フレームや、Requested to Send (RTS : 送信要求) に対する Clear to Send (CTS : 受信準備完了) フレームを送信する場合などが挙げられる。

② DIFS

Distributed Coordination Function (DCF : 自律分散アクセス制御)においてキャリアセンスを行う際に、チャンネルがビジー状態からアイドル状態に遷移したと判断されるまでに必要なチャンネルの連続未使用期間である。

③ PIFS

802.11 規格で定義される Point Coordination Function (PCF : ポーイングに基づく集中制御によるアクセス制御)による集中アクセス制御時に、チャンネルがビジー状態からアイドル状態に遷移したと判断されるまでに必要なチャンネルの連続未使用期間である。

④ EIFS

EIFS は、ビジー状態からアイドル状態に遷移した後、さらに ACK フレームを受信するまでの時間と DIFS 時間を足し合わせた時間を指す。

2.5 次世代通信技術

4K/8K 映像や AR/VR 等のような配信されるコンテンツのリッチ化に伴い、ユーザにより求められる通信品質は、さらに高いものとなってきた。そこで第 4 世代の次の第 5 世代、通称 5G や IEEE802.11ax の研究や標準化、開発が行われてきている。さらに、スマートフォンや PC を 1 ユーザが複数所持すること、ウェアラブル端末の普及を背景に、商用のネットワークに流れるトラフィック量は増大し続けている。このような問題を解決すべく、オフローディング技術の導入も検討されている。

そこで本章では、5G や IEEE802.11ax、オフローディング技術の概要を簡単に記述する。

2.5.1 5G

第 4 世代である IMT-Advanced に次ぐ通信技術、5G は更なるリッチコンテンツの配信や IoT 等のトレンドに対応するために、下記のような条件が求められる[28]。

- ① 大容量化：容量/km² 1000 倍
- ② 高速通信：ユーザ体感スループット 100 倍
- ③ 低遅延化・高信頼性：無線区間の遅延 1ms 以下
- ④ 超多数端末の同時接続：同時接続数 100 倍
- ⑤ 低コスト化・省電力化：通信量当たりのネットワークコスト低減や IoT 端末のサポート

上記のような要求条件を満たすために、5G は、2 つのアプローチを組み合わせることにより実現が検討されている[29]。1 つ目は、LTE 及び LTE-Advanced をさらに進化させていくアプローチ（以降、eLTE：enhanced LTE）、2 つ目は、全く新しい無線アクセス技術を導入するアプローチ（以下、New RAT：Radio Access Technology）である。eLTE では、既存の低い周波数帯を用いて接続性やモビリティの確保を行い、New RAT では、高い周波数帯を用いて更なる高速化・大容量化を実現する。

上記のような要求条件やコンセプトの実現に向け、下記のような候補技術が現在考案されている[30]。

eLTE 及び eLTE との協調を含む候補技術

- A) C/U 分離
- B) 非直交アクセス(Non-Orthogonal Multiple Access)
- C) フレキシブル Duplex
- D) IoT/M2M 関連の LTE 拡張技術

New RAT における候補技術

- E) 新無線パラメータと TTI 長の短縮

- F) 高効率無線フレーム構成
- G) 新信号波形（干渉の局所化）
- H) 大規模 MIMO ビームフォーミング

2.5.2 IEEE 802.11ax

近年、市街地やオフィスにアクセスポイントが乱立し、各々が発する電波の干渉等により、通信品質が低下するといった問題が起こっている。本問題を解決するべく、現在ではアクセスポイント当たりのスループット向上だけではなく、ユーザやエリアごとのスループット向上を目指す技術が検討されている。

IEEE802.11ax[31]では、ユーザスループットを4倍以上向上させることを目標としている。利用シーンは、データ通信のみならず、音声通話、ビデオ通話などの **Quality of Experience (QoE)** の向上、クラウドへのアクセスや携帯電話システムのトラフィックオフロード等、幅広い。想定される利用シーンを下記の4種とし、標準化がすすめられている。

- A) **Residential** : アパートなどにおける数十のアクセスポイントが乱立するシーン
- B) **Enterprise** : オフィスにおける 10~20m 間隔でアクセスポイントが設置されるシーン
- C) **Indoor Small BSS Hotspot** : 屋内において、100 台程度のアクセスポイントが設置されるシーン
- D) **Outdoor Large BSS Hotspot** : 屋外において 100~200m 間隔でアクセスポイントが設置されるシーン

このような利用シーンで高い通信品質を実現するために、下記のような技術が候補として挙げられている。

- ① **OFDM** シンボルの延長
- ② **OFDMA** の適用
- ③ 上りリンク **MU-MIMO** の適用
- ④ **Dynamic Sensitivity Control (DSC)** の適用

2.5.3 オフローディング

オフローディング[32]とは、特定の回線から別の経路にトラフィックを迂回させ、通信網の負荷を軽減させる技術である。[1]においてシスコシステムズが、スマートフォンやリッチなコンテンツの普及を背景にモバイルトラフィックは数倍に増大すると推測している。このようなことから、オフローディングへの研究や取り組みが活発化している。

オフローディングには、主に **Wi-Fi** を経由し、光ファイバー等の固定網へトラフィック迂回させる方法と、より高い周波数、そして広帯域を利用することのできる **4G**、**5G** を活用する方法が存在する。現在では、前者の **Wi-Fi** によるオフローディングが主体であるが、**5G** の標準化が進み、今後は後者のような活用方法も実現することが予測される。

第3章 ビデオストリーミング

現在、インターネット上からビデオデータを受信、視聴をする手法としてダウンロード再生とストリーミング再生が存在する。従来では、サーバに存在するビデオファイルを全てダウンロードしてから同期再生を行うダウンロード再生が主に用いられていた。しかし、ビデオファイルは画像ファイルやテキストファイルと比較してデータ量が大きく、クライアントは動画を視聴するまでの待ち時間が長くなってしまったといった欠点が見られた。そこで、サーバ側で動画ファイルをパケット単位に分割し、分割単位でクライアントに送信、クライアント側でパケットを受信しながら同期再生するストリーミング再生が現在では主流になっている。これにより、クライアントはダウンロード再生と比較して、短い待ち時間で映像を視聴することが可能になった。

3.1 ビデオストリーミングの課題

映像の視聴開始までの時間が短い等の利点があるストリーミング技術だが、下記のような3つの課題を抱えている[33]。

- A) 同期再生：到着時間がばらつくパケットからどのように再生するか
- B) パケット廃棄対策：輻輳やエラーによるパケット廃棄の影響をどのように抑えるか
- C) 輻輳制御：レートを上げると輻輳が起こり、下げると品質が劣化するトレードオフをどのように解決するか

これら課題に対して下記のようなストリーミングプロトコルが用いられている。

3.2 ビデオストリーミングプロトコル

3.2.1 RTP

Real Time Protocol (以降、RTP) [34]は、ビデオストリーミングの課題、パケット廃棄、同期再生に対し、リアルタイムなマルチメディア通信を実現するために、パケットの順番やパケットの送信時刻の管理を行うプロトコルである。パケットの順番の管理は、シーケンス番号を付加することによって行われ、パケット送信時刻の管理はタイムスタンプによって行われる。RTPでは、サーバ側でそれぞれのパケットにシーケンス番号とタイムスタンプを付加する。パケットを受け取ったクライアント側では、パケットのタイムスタンプの時刻を基に再生するタイミングの調節を行う。さらに、シーケンス番号を使って同じタイムスタンプを持つ打データの整列、パケットの抜けの把握を行う。

3.2.2 RTCP

同期再生やパケット廃棄に対する取り決めは RTP により行われる。一方で、RTP Control Protocol (以降、RTCP) [34]は、RTP の補助として用いられ、輻輳制御に対する取り決めを行うプロトコルである。パケット損失率などの通信回線の品質を管理することにより、RTP のデータ転送レートを制御する。

3.3 HTTP/RTSP ストリーミング

インターネットにおけるビデオストリーミングには、2 種類 HyperText Transport Protocol (以降、HTTP)を用いた HTTP ストリーミング方式と専用のプロトコルを用いたストリーミング方式が存在する [35]。専用のプロトコルとしては、標準化されている Real-Time Streaming Protocol (以降、RTSP)や非標準のプロトコルが存在する。今回は、HTTP ストリーミングと専用のプロトコルの代表例として標準化されている RTSP ストリーミングに関して記述する。

HTTP ストリーミングと RTSP ストリーミング間には、図 3.3.1 のような方式の違いが存在する。図 3.3.1 に示す通り、HTTP ストリーミング及び RTSP ストリーミング共に、下記は共通して行われる。

- ① クライアントから WWW サーバへのファイル要求送信
 - ② WWW サーバからクライアントへ、メタファイルの返信
 - ③ クライアント側の Web ブラウザはメタファイルを受け取った後、ビューアソフトを起動
- ①から③が行われた後、HTTP ストリーミングでは、下記が行われる
- ④-⑤ サーバは TCP でストリームファイルの転送、これに対しクライアントは、HTTP による制御を返却

一方、RTSP ストリーミングでは、下記が行われる。

- ④'・⑤' サーバが回線状況に応じて転送プロトコルや転送レートを決定、視聴者に最適な方法でパケットを転送、これに対しクライアントは、パケットを受け取りながら複合・再生

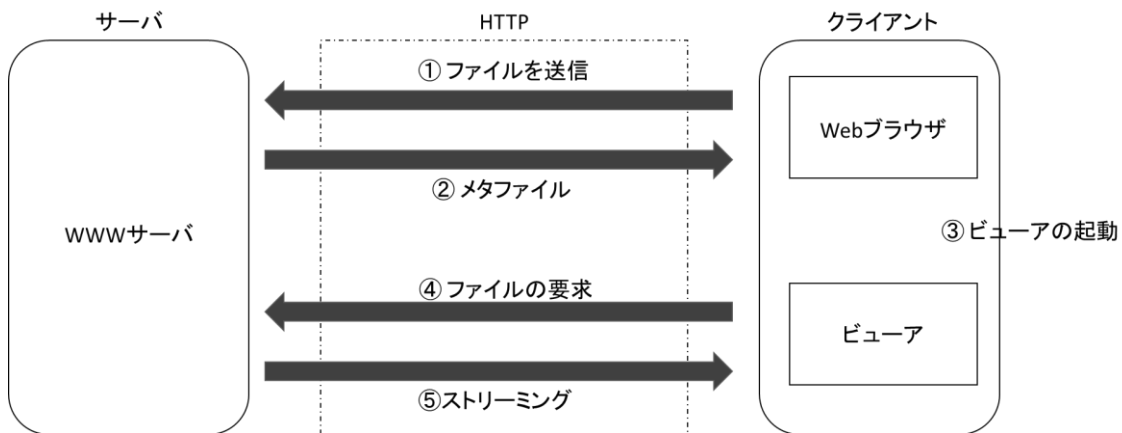


図 3.3.1(a) HTTP ストリーミングの仕組み[35]

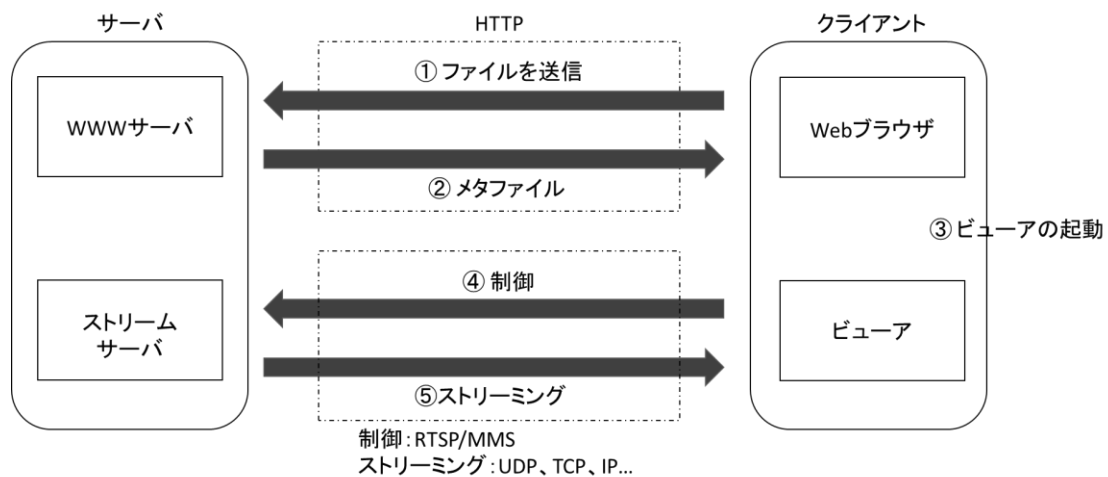


図 3.3.1(b) RTSP ストリーミングの仕組み[35]

3.4 MPEG-DASH

MPEG Dynamic and Adaptive Streaming over HTTP(以降、MPEG-DASH) [36]は、ネットワークの状況に応じて、映像のビットレートを動的に変化させることのできる適応レート制御方式である。図 3.4.1 に MPEG-DASH の構造を示す。MPEG-DASH を用いた映像配信を行う際に、HTTP サーバに予め、複数の品質の映像を保持させる。この複数用意される画質をレプリゼンテーションと呼ばれる階層構造で定義する。1つの映像は、 k 秒ごとに分割された複数のセグメントで構成されており、各セグメントにそれぞれのビットレートが定義され階層的に圧縮されている。さらにサーバには、コンテンツの階層構造を定義した Media Presentation Description(以降、MPD)と呼ばれる xml ファイルが用意され

る。これに対し、クライアントは、MPD ファイルを読み込むことによって、ネットワークの状況に応じた最適なビットレートのコンテンツの取得、再生を行うことができる。

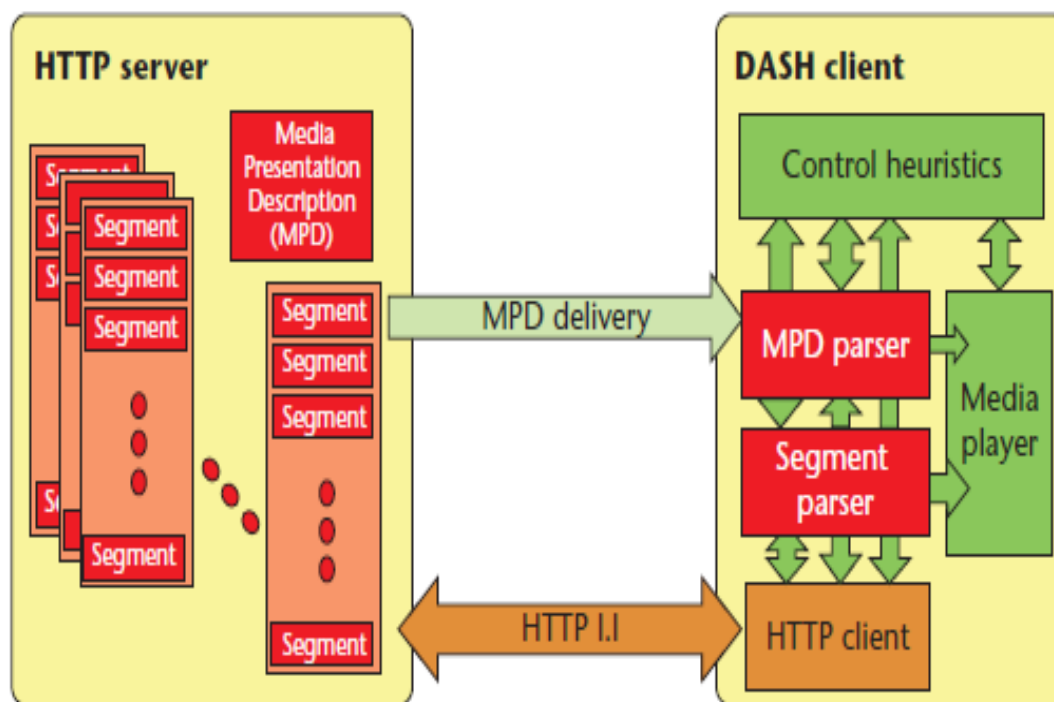


図 3.4.1 MPEG-DASH の構造[36]

3.4.1 MPD

MPD [36]は、xml ファイル内に映像を再生するための情報が記載されたファイルである。記載される情報は、プロファイルの定義、配信するメディアのストリーミング種別、メディアファイルの種類、メディアの長さ、MPD ファイルが存在するディレクトリ等の他に、下記のようなものがある。

- A) **Period** : コンテンツを構成する 1 つの単位
- B) **AdaptationSet** : 映像・音声・字幕等の符号化関連情報
- C) **Representation** : 映像・音声のビットレートや解像度、アスペクト比等の品質に関する情報
- D) **segmentList** : 1 つの映像を k 秒間隔で分割したセグメントに関する情報

上記のような情報が記載された本ファイルをクライアント側で読み込むことにより、定義されたコンテンツのファイルの取得、再生が可能となる。

3.4.2 DASH-JS

MPEG-DASH の実装例の一つに DASH-JS[37]がある。これは、JavaScript によって実装されたものであり、Web ベースで MPEG-DASH の利用ができるよう HTML5 を利用している。さらに Google Chrome が提供する Media Source API を利用している。これによって、クライアントは特別な動画再生プレイヤーを用いず、Google Chrome を通して DASH コンテンツの取得、再生をすることができる。

3.5 ビデオストリーミングにおける再生バッファ制御

3.5.1 バッファリング戦略

映像配信におけるクライアントには、映像セグメントの取得タイミングを制御するバッファが存在する。バッファの挙動には、映像セグメントを取得する ON phase と消費する OFF phase が存在する。[38]では、これら 2 つのフェーズが繰り返される周期が異なる 3 つのバッファリング戦略が提案されている。

A) no ON-OFF cycle

本バッファリング戦略では、図 3.5.1 に示すようにスタートアップ時に全映像セグメントを取得する。映像視聴前のスタートアップ時間が大きくなる一方で、一度、セグメントの取得を終えてしまえば、その後の通信状態に関わらず円滑に映像を再生することが可能となる。

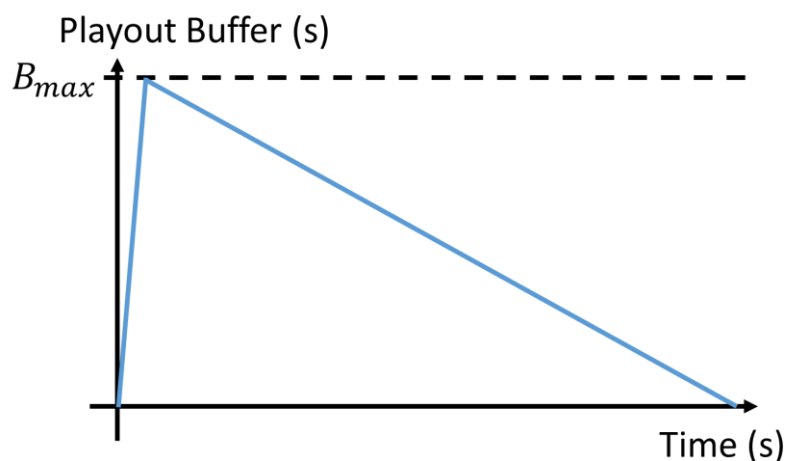


図 3.5.1 no ON-OFF cycle

B) short ON-OFF cycles (Zippy pacing[39])

本バッファリング戦略では、図 3.5.2 に示すように小刻みにセグメントの補充と消費を繰り返す。CONSTANT にセグメントの取得を行うため、バッファ内には常にある一定量のセグメントが保持される。

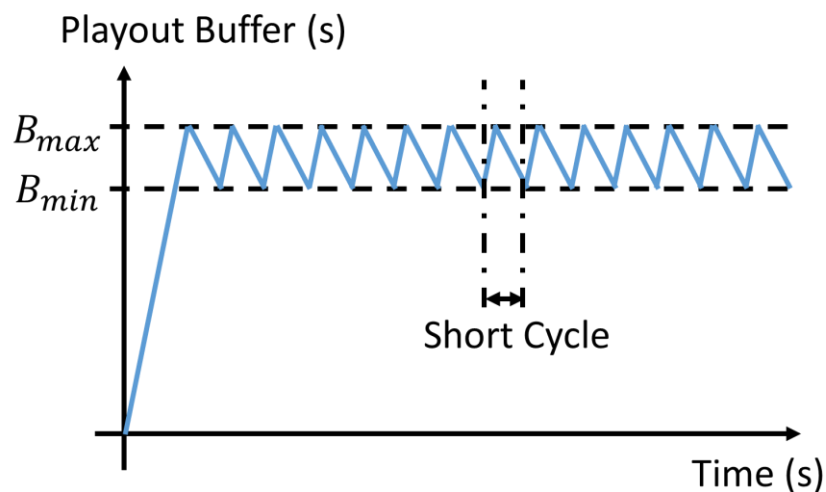


図 3.5.2 short ON-OFF cycle

C) long ON-OFF cycles (Sawtooth pacing[9])

本バッファリング戦略では、図 3.5.3 に示すように長い周期でセグメントの補充と消費を繰り返す。一度に多くのビデオセグメントを補充することで Idle 時間を長くし、消費電力を抑えることができる[17]。

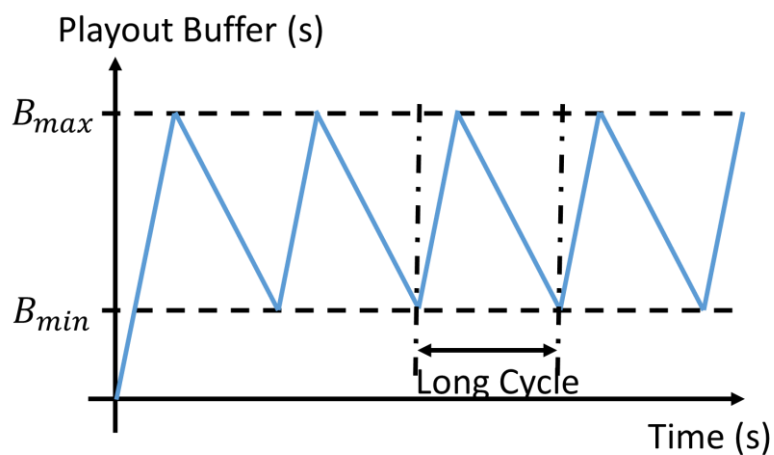


図 3.5.3 long ON-OFF cycle

上記 A)～C)の基本的なバッファリング戦略の応用として [9]や[10]で提案されている手法を Satoda、Kimura とし、下記 D)E)に記述する。

D) Satoda

[9]では、スループットの確率的拡散予測に基づきバッファを制御するペーシング方式を提案している。将来の通信品質が良好な場合はバッファ容量を低減、劣悪な場合はバッファ容量を増大させることにより、**Sawtooth pacing** と比較して再生停止回数が抑えられることをシミュレーションにより示している。

E) Kimura

[10]では、過去のスループット情報に基づくペーシングアルゴリズムを提案している。現在のスループットが相対的に低い場合、低ビットレートのデータの受信を最低限に行う。一方でスループットが相対的に高い場合、高ビットレートのデータを積極的に受信する。シミュレーション評価結果より、本手法は **Satoda** の提案手法と比較してバッファ長の増加を約 9%抑制し、ビットレートを 44%向上できることを明らかにしている。

3.5.2 Wi-Fi 及び LTE 使用時の映像配信における消費電力

3.5.1 章で述べた通り、映像配信時のクライアントには 2 つのフェーズ **ON phase** と **OFF phase** が存在する。簡略的に述べると **ON phase** は通信時、**OFF phase** は非通信時である。[17]により NDN ネットワーク環境下で Wi-Fi を利用した時、通信時は非通信時と比較して高い消費電力となること、一度にセグメントを多く受信し、**OFF phase** を長くする程、電力が抑えられることが明らかになっている。さらに[40]では、2.2.3 章で示した **LTE** 通信時の状態遷移を活用した映像配信時の電力モデルを提案している。この電力モデルの提案と共に、**ON-OFF** サイクルを少なくし(つまり **Long ON-OFF cycle**)、データ受信後に現れる **Tail** 電力の発生を抑えることで、電力が抑えられることを示している。これらの結論は、NDN ネットワーク環境下で確認されているが、IP ネットワークにおいても同様の傾向を示すことが期待される。[40]の詳細に関しては、第 4 章に記述する。

このように **LTE** ネットワーク環境下における映像配信では、バッファ容量を拡大し、**Long ON-OFF cycle** にすることで、長い **OFF phase** 期間の確保、**Tail** 電力の発生回数の低減により、電力を抑えることができる。

第4章 映像配信における消費電力推定モデル

本章は、スループット履歴やスループット予測技術により導出される通信速度変動を基に、消費電力加えて再生中断時間を見積もることを目的としている。そこで、まず映像配信における4状態の定義を行う。次に、通信速度変動からこれら各状態の所要時間の算出、算出された状態所要時間から消費電力及び再生中断時間を推定するモデル式の提案をする。最後に、提案モデルに対し、本モデルから導出される推定値と実測値の比較による妥当性の評価、及びスループット予測技術を取り入れた応用例を示す。

4.1 映像配信における4状態

バッファリングを考慮する映像配信には、第3章で述べた通り、ON phase と OFF phase の2状態が存在する。本研究では、バッファリングだけでなく通信品質変動も考慮するため、映像配信時の状態をさらに詳細に4分割する。その4状態を図4.1.1の①～④に示し、以下に記述する。加えて、図4.1.2に状態遷移図を示す。但し、図4.1.2中の B_{max} 及び B_{min} をバッファの上限と下限、 $B(t)$ 及び $Th(t)$ を映像配信が開始してから ts 後のバッファ容量、スループットとし、 R は配信される動画のビットレートとする。

- ① ON startup phase : 視聴開始前に映像セグメントの取得のみを行う。取得した映像セグメントはバッファに蓄積され、その容量がバッファの下限である B_{min} に達した時、②又は③の状態に遷移する。この状態の間、動画像の再生はされないため、この状態の所要時間は再生中断時間を示す。
- ② [Good] ON playout phase : セグメントがバッファ内に十分に補充され、視聴を行いながら映像セグメント取得を行う。視聴する動画像のビットレートに対し、ネットワークのキャパシティが十分大きく、良好な映像配信が行えている状態である。本状態では、視聴によるセグメントの消費速度より、取得速度の方が早いため、バッファ容量は上限である B_{max} に向かう。 B_{max} に至った時、④の状態に遷移する。
- ③ [Bad] ON playout phase : セグメントがバッファ内に十分に補充され、視聴を行いながら映像セグメント取得を行う。視聴する動画像のビットレートに対し、ネットワークのキャパシティが小さく、劣悪な映像配信が行われている状態である。本状態では、視聴によるセグメントの消費速度より、取得速度の方が遅いため、バッファ容量は枯渇状態である0に向かう。枯渇した時①の状態に遷移し、動画の再生が停止される。
- ④ OFF phase : 映像セグメントの取得を一時中断し、視聴のみを行う。本状態の間は通信を行わない。視聴によるセグメントの消費が行われ、バッファ容量は下限である B_{min} に向かう。下限に達した時、②又は③の状態に遷移する。

表 4.2.1 モデルパラメータ

Parameter	Description
$x(t)$	t s 後のスループットを表す関数
$P(x)$	スループット x Mbps に対する消費電力を表す関数
$\Delta t_{S1}, \Delta t_{S2}, \Delta t_{S3}, \Delta t_{S4}$	各状態の所要時間 (s)
t_0	各状態のスタート時間 (s)
Δt_i	1 セグメント増加/減少にかかる時間 (s)
R_i	レプリゼンテーション (Mbps)
k	セグメント分割単位 (s)
B_{\max}	バッファ容量の上限 (s)
B_{\min}	バッファ容量の下限 (s)

表 4.2.1 に示すモデルパラメータを用いて、映像配信における 4 状態の所要時間と消費電力を推定するモデル式を下記に記述する。通信速度変動から、状態所要時間を推定する際に、図 4.2.1 のような概念を考慮してモデルを構築している。

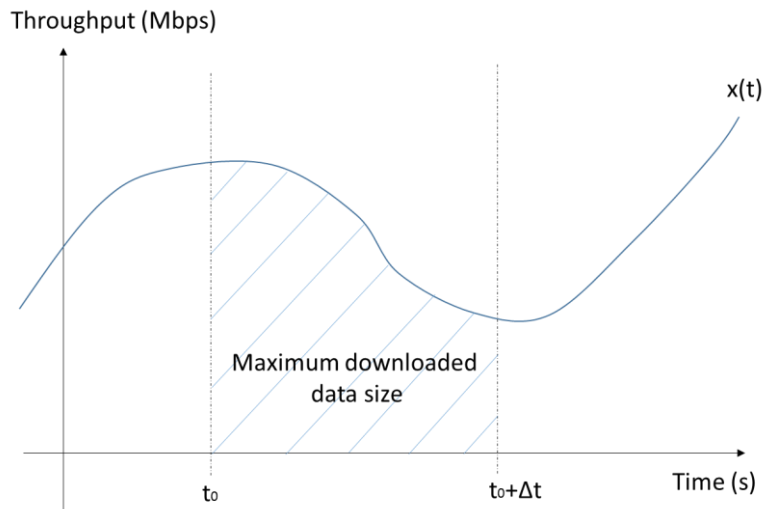


図 4.2.1 モデル構築概念図

① ON startup phase

まず、式(4.2.1)により 1 セグメント受信にかかる時間を導出し、その結果を用いて、式(4.2.2)により本状態 1 サイクルの所要時間を決定する。

$$\int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_i} x(t) dt = R_i \times k \quad (4.2.1)$$

$$\Delta t_{S1} = \sum_{i=1}^{\frac{B_{\min}}{k}} \Delta t_i \quad (4.2.2)$$

上式により、 Δt_{S1} を算出し、式(4.2.3)に代入することで、本状態 1 サイクルにかかる電力 E_{S1} を得る。

$$E_{S1} = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_{S1}} P(x(t)) dt \quad (4.2.3)$$

② [Good] ON playout phase

まず、式(4.2.4)により 1 セグメント増加にかかる時間を導出し、その結果を用いて、式(4.2.5)により本状態 1 サイクルの所要時間を決定する。

$$\int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_i} (x(t) - R_i) dt = R_i \times k \quad (4.2.4)$$

$$\Delta t_{S2} = \sum_{i=1}^{\frac{B_{\max} - B_{\min}}{k}} \Delta t_i \quad (4.2.5)$$

上式により、 Δt_{S2} を算出し、式(4.2.6)に代入することで、本状態 1 サイクルにかかる電力 E_{S2} を得る。

$$E_{S2} = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_{S2}} P(x(t)) dt \quad (4.2.6)$$

③ [Bad] ON playout phase

まず、式(4.2.7)により 1 セグメント減少にかかる時間を導出し、その結果を用いて、式(4.2.8)により本状態 1 サイクルの所要時間を決定する。

$$\int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_i} (R_i - x(t)) dt = R_i \times k \quad (4.2.7)$$

$$\Delta t_{S3} = \sum_{i=1}^{\frac{B_{\min}}{k}} \Delta t_i \quad (4.2.8)$$

上式により、 Δt_{S3} を算出し、式(4.2.9)に代入することで、本状態 1 サイクルにかかる電力 E_{S3} を得る。

$$E_{S3} = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_{S3}} P(x(t)) dt \quad (4.2.9)$$

④ OFF phase

まず、式(4.2.10)により 1 セグメント消費にかかる時間を導出し、その結果を用いて、式(4.2.11)により本状態 1 サイクルの所要時間を決定する。

$$\Delta t_i = k \quad (4.2.10)$$

$$\Delta t_{S4} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{\sum_{i=1}^k \Delta t_i} \quad (4.2.11)$$

上式により、 Δt_{S4} を算出し、式(4.2.12)に代入することで、本状態 1 サイクルにかかる電力 E_{S4} を得る。

$$E_{S4} = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_{S4}} P(x(t)) dt \quad (4.2.12)$$

本モデル式による誤差

ON playout phase における状態所要時間の推定値は、1 セグメント増加・減少単位で離散的に加算して求められる。例えば、バッファ内のセグメントが 1 増加する場合、 Δt_i 期間内にセグメントを 2 取得、1 消費する等のように、 Δt_i 期間内に考慮しなければならないセグメントが複数存在する可能性がある。これは、DASH 配信時、短い期間にビットレートが大幅に変化する場合、推定値の誤差の原因となる。上記例において、取得された 2 セグメントで、それぞれ異なるビットレートが選択されたと仮定すると Δt_i に誤差が生じる。

より理論値に近い推定値を導出するには、ON playout phase のモデル式を 1 セグメント増加・減少単位ではなく、取得・消費で別の時間軸を持った関数を利用し、取得・消費単位で構築する必要がある。しかし、今回は式が複数に分割してしまうこと、条件分岐が多く発生してしまうことから、上式のような簡潔な形となるよう構築した。

4.3 提案モデルの検証

本章では、状態所要時間及び消費電力の実測値と 4.2 章で提案したモデル式から導出される推定値の比較を行うことで、提案モデルの妥当性を検証する。さらに本モデル式は、スループット予測技術を取り入れることで、将来の映像配信特性の予測として応用することができる。そこで、通信速度変動を示す関数にスループット予測技術により導出された値を用いることで、将来の状態所要時間及び消費電力を予測する応用例の紹介も行う。

提案モデルにおける t_s 後のスループットを表す関数の導出方法の例として、"過去に観測されたスループットデータ自信を直接用いる方法"、"確定的予測"、"確率的拡散予測"が挙げられる。"過去に観測されたスループットデータ自信を直接用いる方法"により導出された通信速度変動から算出される推定値は、実測値と比較することにより本モデル式の妥当性の検証に用いることができる。一方で、"確定的予測"、"確率的拡散予測"により導出され

た通信速度変動から算出される推定値は、将来の映像配信特性を予測する応用例として示すことができる。さらに、スループット x Mbps に対する消費電力を表す関数の例として、予備実験により構築された”電力効率導出モデル”、従来研究で構築された”LTE 通信時の状態を考慮した電力モデル”が挙げられる。これらの方法に関して、下記に記述する。

4.3.1 スループット導出方法

本章では、 t_s 後のスループット導出方法である、”過去に観測されたスループットデータ自信を直接用いる方法”、”確定的予測”、”確率的拡散予測”について記述する。

① 過去に観測されたスループットデータ自信を直接用いる方法

過去に通信をした際に観測されたスループットデータを有体に、 t_s 後のスループットを表す関数として用いる方法である。本手法により導出されたスループット変動は、他の方法により導出されたスループット変動より、実測値に近い推定値を求めることができる。但し、通信品質は通信を行うシチュエーションにより決定するので、本手法を用いる場合は、推定値を算出したいシチュエーションのサンプルデータを予め収集する必要がある。

② 確定的予測

スループットの確定的予測とは、無限にある未来のスループットの可能性の中からもっともらしい値、通常は期待値を選択し、予測値とする手法である[41]。[41]において、スループットの確定的予測は困難であると記述されているが、[10]に示されているように場所、時間、上り/下り、無線規格等のシチュエーションにより詳細に場合分けをすることにより、実現可能であると考えられる。そこで、本評価実験では、確定的予測を t_s 後のスループット導出方法の 1 つとして用いる。

③ 確率的拡散予測

スループットの確率的拡散予測とは、TCP スループットを確率変数として扱い、その確率的な広がり(確率的拡散)を予測値とする手法である[41]。図 4.3.1 に TCP スループット変動と確率的拡散のイメージを示す。青点線をスループットの確定的予測値とすると、確率的拡散予測値は、赤線で示す部分を指す。

[41]で示される確率的拡散予測では、Wiener 過程が用いられている。そこで、確率的拡散に関する記述をする前に Wiener 過程に関して記述する。

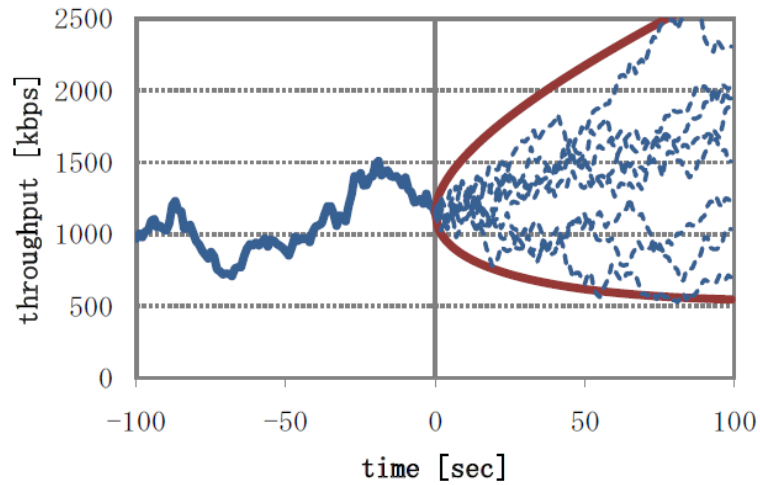


図 4.3.1 TCP スループット変動と確率的拡散のイメージ[41]

Wiener 過程

下記の条件が成り立つ確率過程を Wiener 過程とする。

$W(t)$: 確率過程

σ^2 : 分散

条件 1 : $W(t)$ は独立増分である。

時刻 t の時の確率過程 $W(t)$ は以前の値とは無関係。独立である。

条件 2 : $\forall s, t > 0 \rightarrow W(s+t) - W(s)$ は $N(0, \sigma^2 s)$ に従う。

時刻 $s+t$ と時刻 s の変化量は正規分布により決定する。

$$N(0, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

* 上記は正規分布の一般式である。Wiener 過程では、経過時間が大きくなるほど分散が大きくなる。

条件 3 : $W(0) = 0$ 且つ $W(t)$ は $t=0$ で連続である。

Wiener 過程の一般式は、上記条件にドリフト μ を考慮したものである。

$$N(\mu t, \sigma^2 t) \quad (4.3.1)$$

上記に示す Wiener 過程を用いて、TCP スループットの確率的拡散は予測される。

TCP スループットの確率的拡散予測

TCP スループットの確率的拡散予測では、TCP スループットが Wiener 過程に従って変動すると仮定する。その際の時間 t 後の TCP スループット x の確率密度関数 $f(x, t)$ は、

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t}} \exp\left(-\frac{(x - x_0 - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right) \quad (4.3.2)$$

で表される。但し x_0 は現在時刻のスループット、 $\sigma^2 t$ は分散を表す。確率的拡散の指標としては、標準偏差が適当であり、その値は $\sigma\sqrt{t}$ となる。これにドリフトを考慮すると、図 4.3.1 の赤線が式(4.3.3)により求められる。式(4.3.3)中の α は確率的拡散を求める予測範囲を決定する定数である。

$$x(t)^\pm = x_0 + \mu t \pm \alpha \sigma \sqrt{t} \quad (4.3.3)$$

TCP スループットの確率的拡散と Wiener 過程に従う確率密度関数との関係を表した模式図を図 4.3.2 に示す。t=0 に近い程確率密度関数は尖った形になり、t が大きくなるほど平たい形になる。

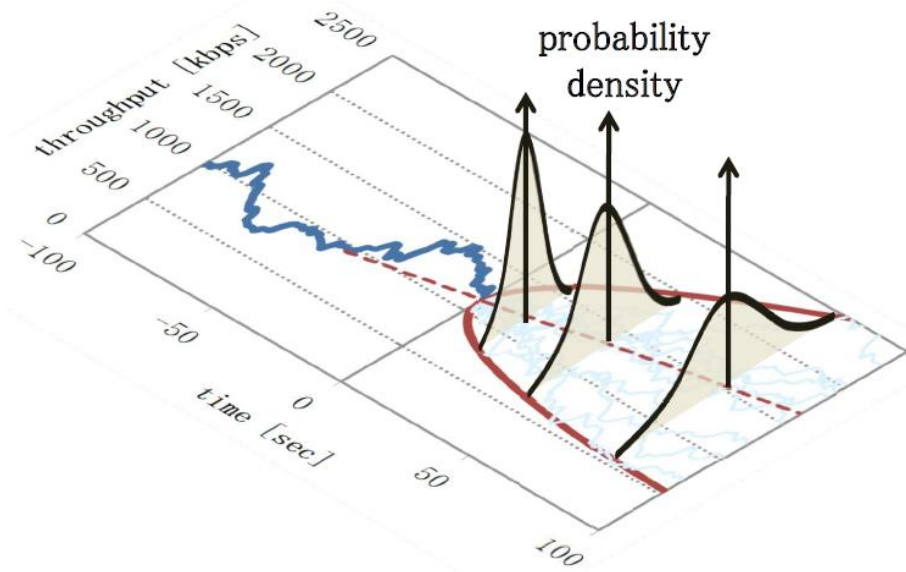


図 4.3.2 TCP スループットの確率的拡散モデル[41]

4.3.2 消費電力導出方法

本章では、スループット x Mbps に対する消費電力導出方法である、予備実験により構築された”電力効率導出モデル”、従来研究で構築された”LTE 通信時の状態を考慮した電力モデル”について記述する。

A) 電力効率導出モデル

スループットに対する一定のデータ量受信時の消費電力を導出する数理モデルを作成する。本数理モデル作成にあたり、消費電力計測実験を行う。

まず、様々なスループットで通信した際のスマートフォン端末の消費電力を計測する。評価項目である受信スループットを計測するために、図 4.3.3 に示すように、早稲田大学内に設置したコンテンツ配信サーバから動画セグメントをスマートフォン Galaxy S4(Android バージョン 4.2.2)で受信する環境を構築する。また、消費電力の計測には Monsoon Power Monitor [42]を使用し、これを計測対象であるスマートフォンに接続する。配信サーバとスマートフォン間の通信は、Wi-Fi (IEEE802.11n)及び LTE である。

この環境により、計測した受信スループット[Mbps]と消費電力量[mJ]から 1Mbit 受信あたりの消費電力量[mJ/Mbit]を算出し、スループットに対する電力効率を示す近似式を導出する。

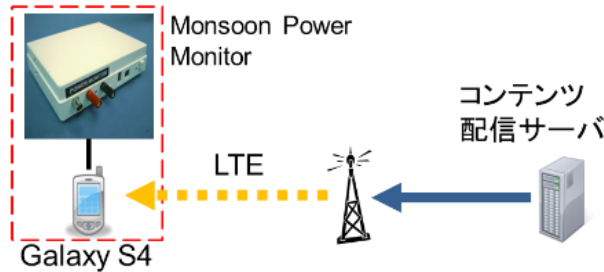


図 4.3.3(a) LTE を用いた実験環境

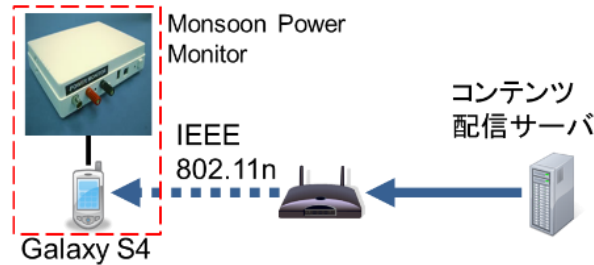


図 4.3.3(b) Wi-Fi を用いた実験環境

受信スループット[Mbps]と 1 Mbit 受信あたりの消費電力量[mJ/Mbit]の関係を式(4.3.4) (4.3.5)及び図 4.3.4 に示す。式(4.3.4)を Wi-Fi 使用時、式(4.3.5)を LTE 使用時のスループットに対する電力効率を示す近似式とする。

$$PowerEfficiency = \frac{1578}{Throughput} \quad (4.3.4)$$

$$PowerEfficiency = \frac{2299}{Throughput} \quad (4.3.5)$$

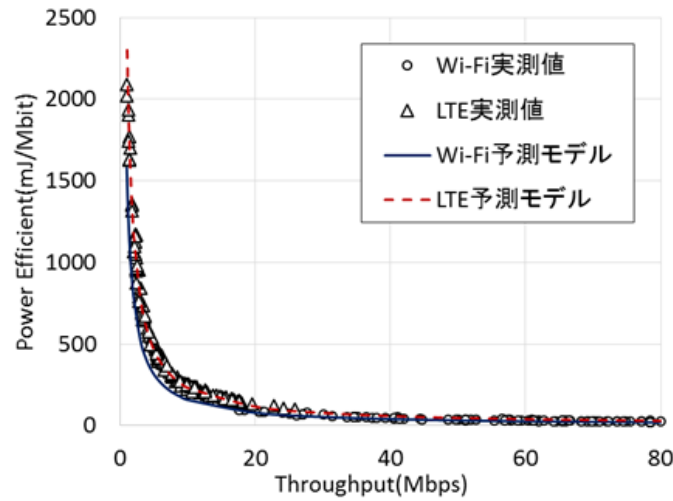


図 4.3.4 受信スループットと 1 Mbit 受信あたりの消費電力

図 4.3.4 から、スループットと 1 Mbit 受信あたりの消費電力量の関係は、Wi-Fi、LTE 共に反比例の式に近似できることがわかる。高スループットで一定量のデータを受信する場合は、低スループットで受信した場合よりも通信時間が短くなるため、1bit 受信あたりの消費電力量が小さくなる。したがって、スループットが高いほど、電力効率が良くなるということが言える。

また、式(4.3.4)(4.3.5)の係数は、スループットに無関係に 1 秒間のデータ受信にかかる消費電力量[mW]の近似値を示している。これらの係数を比較すると、Wi-Fi は、LTE より電力効率が良いことが確認される。本実験により導出した式(4.3.4)(4.3.5)を、電力効率を導出する数理モデルとする。

B) LTE 通信時の状態を考慮した電力モデル

[40]では、2.2.3 章に示す LTE 通信時の状態遷移に着目し、各状態における電力の観察及び電力モデルの構築が行われている。

図 2.2.5 に示すように LTE によるデータの受信には、受信を実際に行っている受信状態、DRX 状態、IDLE 状態が存在する。これを考慮した上で消費電力の計測対象であるスマートフォン Galaxy S4(Android バージョン 4.2.2)に Monsoon Power Monitor を接続し、LTE 通信時の電力の変動を観察する。その観察した結果を図 4.3.5 に示す。図 4.3.5 に示される通り、通信開始時、電力は急激に上昇する。通信を終えると即座に待機電力には戻らず、待機電力より大きく、通信時の電力より小さい消費電力(以降 Tail 電力)が一定時間(以降、 ΔT_{tail})現れる。Tail 電力出現後、待機電力に戻る。Tail 電力の値、出現時間は、端末依存であると予測され、受信データ量には依存しない。

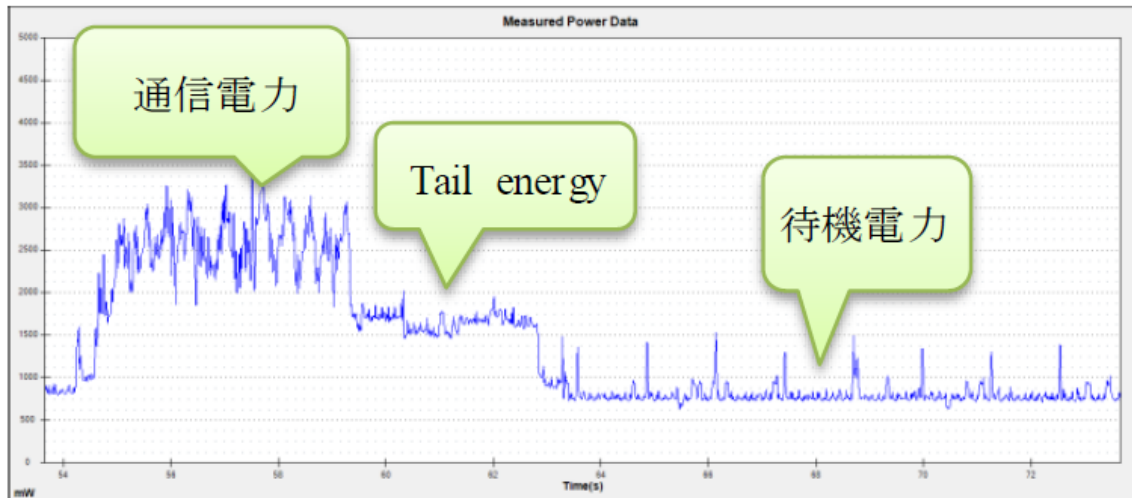


図 4.3.5 観察された LTE 通信時のスマートフォン消費電力[40]

上記のような観察を基に、LTE 使用時のスマートフォンにおける消費電力のモデル化を行っている。ここで提案されるモデルも、図 4.3.5 に示される通り、通信状態で消費される電力、Tail 状態で消費される電力、待機状態つまり Idle 状態で消費される電力に場合分けされる。下記に、LTE 通信時の状態を考慮した電力モデルを示す。但し、[40]で示されている電力モデルは、NDN 環境下のものであるので、今回は[43]で示されている IP ネットワーク環境下のモデルを引用する。

通信状態で消費される電力

スループット x Mbps でデータを受信した際の消費電力 mW を算出するモデルを式(4.3.6)に示す。

$$P_x = 967.706x^{0.14} + 640 \quad (4.3.6)$$

Tail 状態で消費される電力

Tail 状態で消費される電力及び Tail 電力出現時間を式(4.3.7)(4.3.8)に示す。

$$P_{\text{tail}}=1850 \quad (4.3.7)$$

$$T_{\text{tail}}=3.63 \quad (4.3.8)$$

Idle 状態で消費される電力

Idle 状態で消費される電力を式(4.3.9)に示す。

$$P_{\text{idle}}=1000 \quad (4.3.9)$$

式(4.3.6)から式(4.3.9)を用いて、LTE 通信時の消費電力を推定することが可能である。

4.3.3 評価環境及び評価方法

本評価では、まず図 4.3.3 に示すような Wi-Fi 環境及び LTE 環境を用いて、映像配信における各セグメント受信時のスループット及び各状態の所要時間、消費電力の実測値を計測する。評価項目である受信スループットを計測するために、早稲田大学内にコンテンツ配信サーバを設置し、本サーバから映像セグメントをスマートフォン Galaxy S4 で受信する。配信される映像は、[44]により提供される 4K 動画の”Tears of Steel”を H.264./AVC により予め圧縮したものとする。また、コンテンツ配信サーバは DASH-JS により実装されており、クライアント端末側で、映像セグメントの取得時間、バッファ容量、受信スループット、セグメントのビットレートのログを表示することが可能である。本ログファイルを用いて、各状態の所要時間の実測値を算出する。消費電力の計測には Monsoon Power Monitor を使用し、これを計測対象であるスマートフォンに接続する。本計測実験のパラメータを表 4.3.1 に示す。

表 4.3.1 計測実験パラメータ

Parameter	Value
$x(t)$	過去に観測されたスループット
	確定的予測によるスループット
	確率的拡散予測によるスループット
$P(x)$	電力効率 mJ/Mbit(*)
	電力 mW
k	2 s
B_{\max}	30 s
B_{\min}	20 s

その後、実測されたスループットを有体を使用する方法及び確定的予測、確率的拡散予測を用いることで、 t s 後のスループット変動を 3 種導出する。確定的予測及び確率的拡散予測の本評価におけるパラメータ設定、利用方法は下記に記載する。これら 3 種の通信速度変動から 4.2 章で提案したモデル式を用いて、各状態の所要時間及び消費電力の推定値を導出する。消費電力の推定値を導出するにあたり、今回は、LTE 通信時の状態を考慮した電力モデルのみを使用する。上記に示した電力効率導出モデルは、一定データ量受信時のスループットに対する消費電力の傾向を知ることが目的として構築されたモデル式であり、サンプル数や試行シチュエーションにより数値が変動するため、本評価実験では使用しない。

過去に観測されたスループットデータ自信を直接用いる方法

本評価における過去に観測されたスループットデータ自信を直接用いる方法では、映像配信時にセグメントを取得した際のスループットを用いる。但し、スループットの観測されない期間 OFF phase 時のスループットに関しては、OFF phase 前後の ON phase で観測されたスループットから平均値を算出し、その値を代用する。

確定的予測によるスループット予測方法

A) ユーザが立ち止まり映像を視聴する場合(Stay)

本評価におけるスループットの確定的予測では、過去のスループットデータによる平均値 or 中央値を算出し、その値を予測値とする。

B) ユーザが移動しながら映像を視聴する場合(Move)

本評価におけるスループットの確定的予測では、過去のスループットデータによる 100s ほどの平均値 or 中央値を算出し、その値を予測値とする。

確率的拡散によるスループット予測方法

A) ユーザが立ち止まり映像を視聴する場合 (Stay)

本評価におけるスループットの確率的拡散予測は、下記の手順で行われる。

- ① 映像配信を開始してから最初 30 サンプル(=n)を予測用データとして取り出す。
- ② 取り出した予測用データを用いて、式(4.3.3)における μ 及び σ を式(4.3.10)(4.3.11)から導出する。 \bar{x} を 30 サンプルの平均値、 $x(-k)$ を時間 k 前に観測されたスループット値、m を予測直前の 10 サンプルとする。

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=0}^{n-1} (\bar{x} - x(-k))^2 \quad (4.3.10)$$

$$\mu = \frac{m \sum_{k=0}^{m-1} (-k)x(-k) - \sum_{k=0}^{m-1} (-k) \sum_{k=0}^{m-1} x(-k)}{m \sum_{k=0}^{m-1} k^2 - (\sum_{k=0}^{m-1} (-k))^2} \quad (4.3.11)$$

- ③ 図 4.3.1 に示される赤線部である式(4.3.3)が②により求まり、本曲線を推定値とする。
- ④ t が大きくなる程、予測値の広がりが大きくなるため、図 4.3.6 のように上限値・下限値を決定し、その後の値を一定とする。上限値は、予測データである 30 サンプル内の最大のスループット、下限値は、最小のスループットとする。

このように将来のスループットの確率的な広がりを求めることで、通信品質が将来優良になる場合と劣悪になる場合の状態所要時間、消費電力を推定することができる。また、本評価において、ユーザの位置は固定されているため、スループットの拡散度合を示す α は 0.01 と小さい値に設定する。

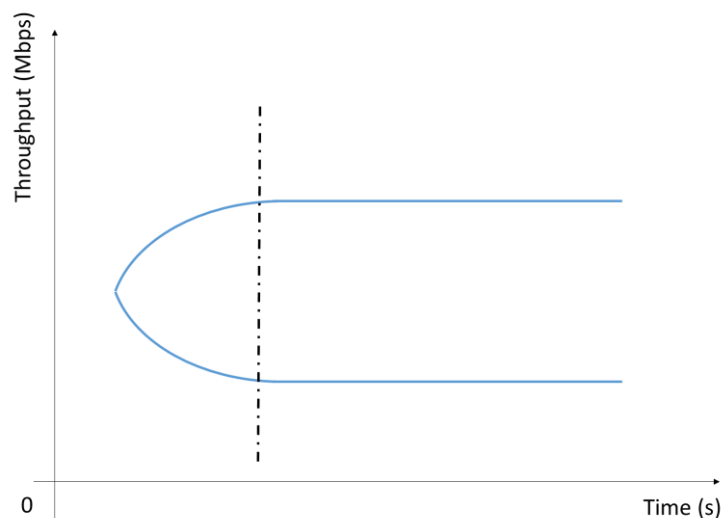


図 4.3.6 Stay 状態における確率的拡散予測手法

B) ユーザが移動しながら映像を視聴する場合 (Move)

本評価におけるスループットの確率的拡散予測は、下記の手順で行われる。

- ① 取り出した予測用データを用いて、映像配信を開始してから最初 10 サンプル(=n)を予測用データとして取り出す。
- ② 取り出した予測用データを用いて、式(4.3.3)における μ 及び σ を式(4.3.10)(4.3.11)から導出する。 \bar{x} は 10 サンプルの平均値、 $x(\cdot k)$ を時間 k 前に観測されたスループット値、 m は予測直前の 10 サンプルとする。
- ③ 図 4.3.1 に示される赤線部である式(4.3.3)が②により求まり、本曲線を推定値とする。
- ④ t が大きくなる程、予測値の広がりが大きくなるため、図 4.3.7 のように上限値・下限値を決定し、その後の値を一定とする。上限値は、予測データである 10 サンプル内の

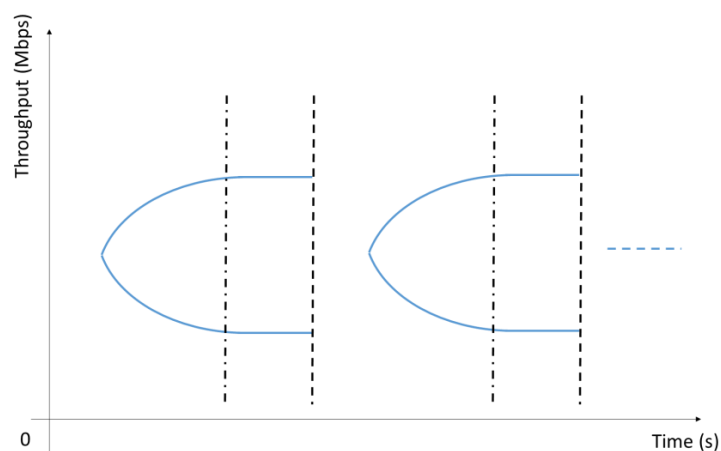


図 4.3.7 Move 状態における確率的拡散予測手法

最大のスループット、下限値は、最小のスループットとする。

- ⑤ 100 s 経過後①から再度予測を繰り返す
- ⑥ このように将来のスループットの確率的な広がりを求めることで、通信品質が将来優良になる場合と劣悪になる場合の状態所要時間、消費電力を推定することができる。また、本評価において、ユーザが移動するシチュエーションでは、スループットが大きく変動することが想定される。そこで、スループットの拡散度合を示す α は 0.05 と小さい値に設定する。

4.3.4 シナリオ

本評価におけるシナリオを表 4.3.2 に示す。

表 4.3.2 評価シナリオ

Scenario	Behavior	Bitrate	Playback time	Interface	Location
①	Stay	1 Mbps	260 s	LTE	早稲田大学 55 号館 S 棟 5 階
②	Stay	2 Mbps	260 s	LTE	早稲田大学 55 号館 S 棟 5 階
③	Stay	3 Mbps	260 s	LTE	早稲田大学 55 号館 S 棟 5 階
④	Stay	DASH (1,2,3 Mbps)	260 s	LTE	早稲田大学 55 号館 S 棟 5 階
⑤	Stay	10 Mbps	600 s	IEEE802.11n	早稲田大学 55 号館 S 棟 5 階
⑥	Stay	20 Mbps	600 s	IEEE802.11n	早稲田大学 55 号館 S 棟 5 階
⑦	Stay	30 Mbps	600 s	IEEE802.11n	早稲田大学 55 号館 S 棟 5 階
⑧	Stay	DASH (10,20,30 Mbps)	600 s	IEEE802.11n	早稲田大学 55 号館 S 棟 5 階
⑨	Walk	DASH (10,20,30 Mbps)	800 s	LTE	Route 1 (Optimal)
⑩	Walk	DASH (10,20,30 Mbps)	800 s	LTE	Route 2 (Shortest)

4.3.5 評価結果

表 4.3.2 に示すシナリオで、映像配信を行った際の各状態の所要時間、消費電力の評価結果を示す。但し、今回は 1 回の映像配信で消費される電力の評価を行ったため、消費電力は、消費電力量 [J] で評価される。また、ON startup phase の所要時間は、再生中断時間を示している。

Scenario①

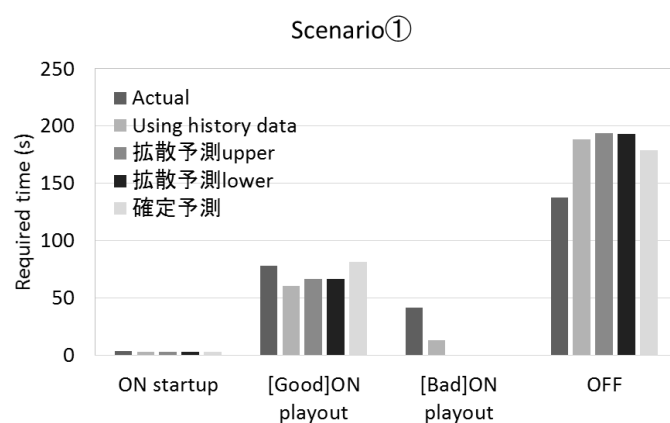


図 4.3.8(a) 状態所要時間 (s)

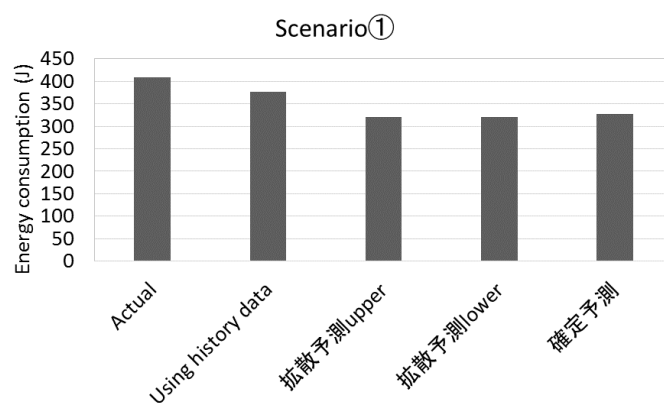


図 4.3.8(b) 消費電力量 (J)

Scenario②

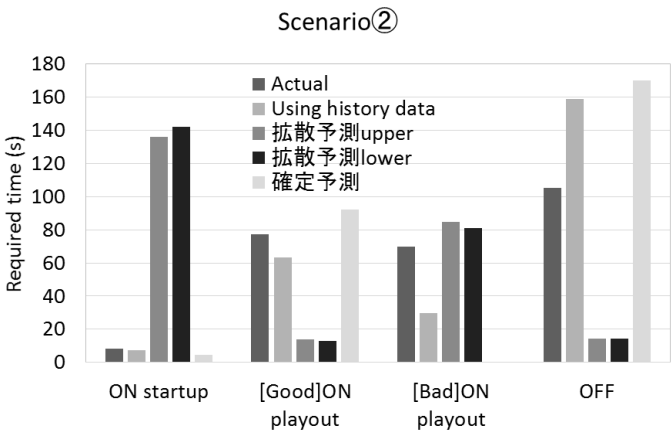


図 4.3.9(a) 状態所要時間 (s)

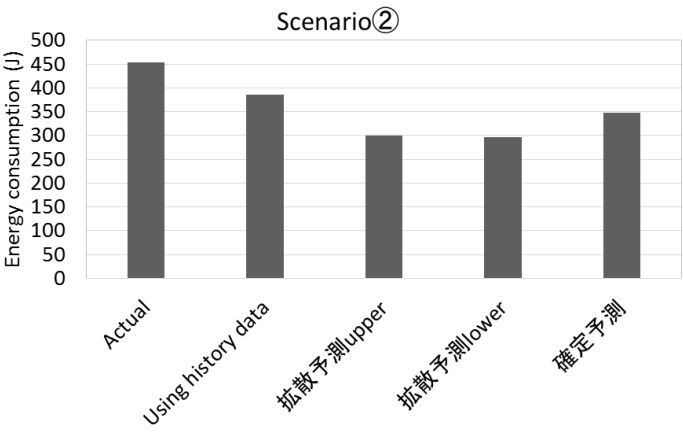


図 4.3.9 (b) 消費電力量 (J)

Scenario③

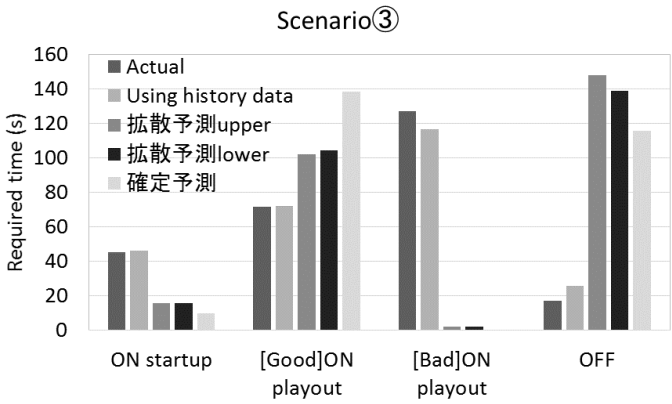


図 4.3.10 (a) 状態所要時間 (s)

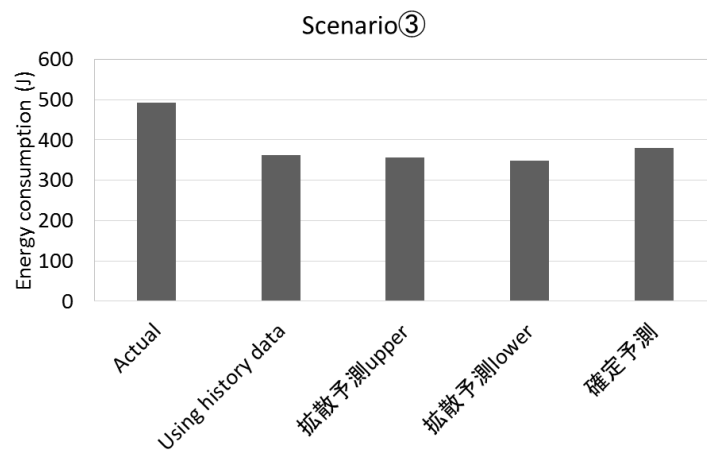


図 4.3.10 (b) 消費電力量 (J)

Scenario④

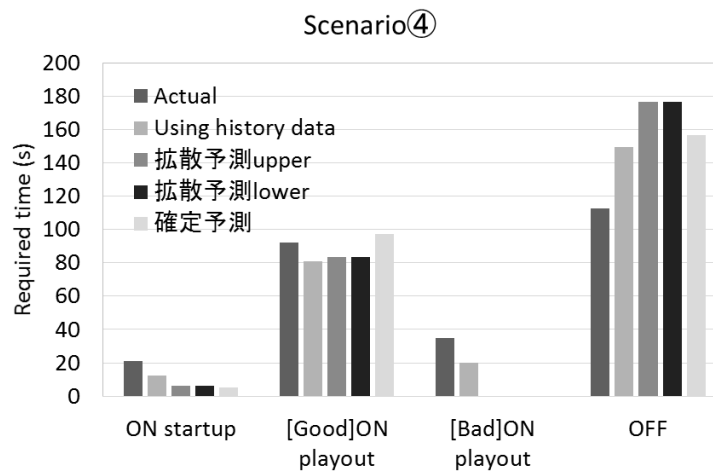


図 4.3.11(a) 状態所要時間 (s)

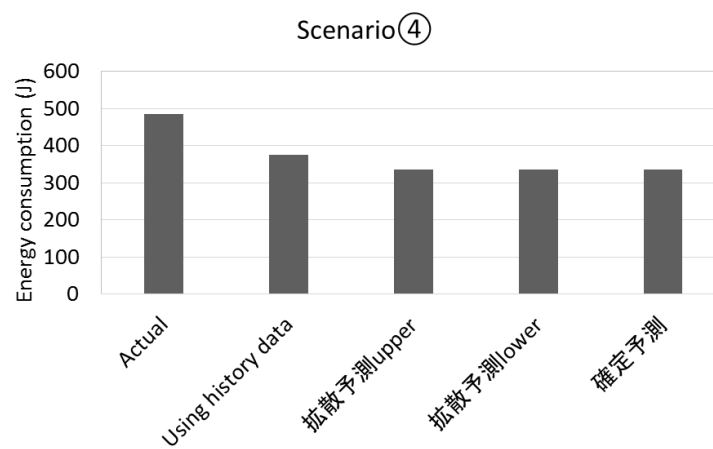


図 4.3.11 (b) 消費電力量 (J)

Scenario⑤

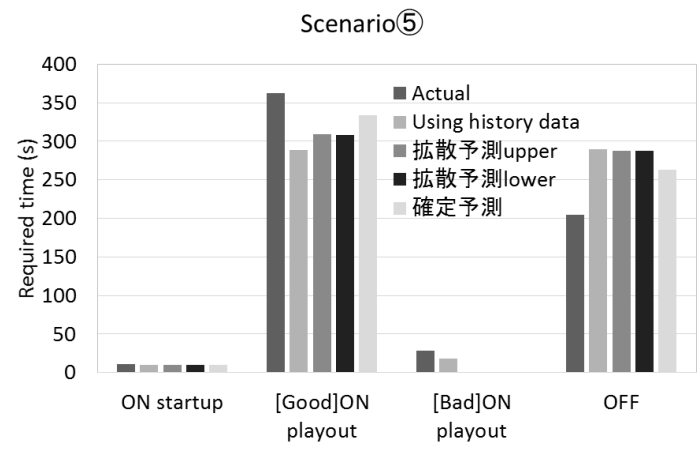


図 4.3.12(a) 状態所要時間 (s)

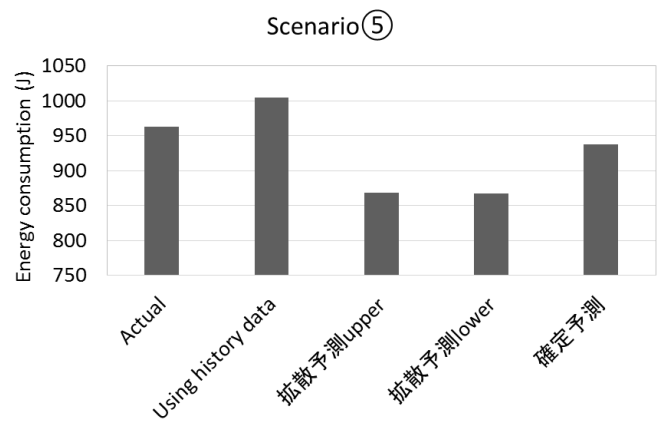


図 4.3.12(b) 消費電力量 (J)

Scenario⑥

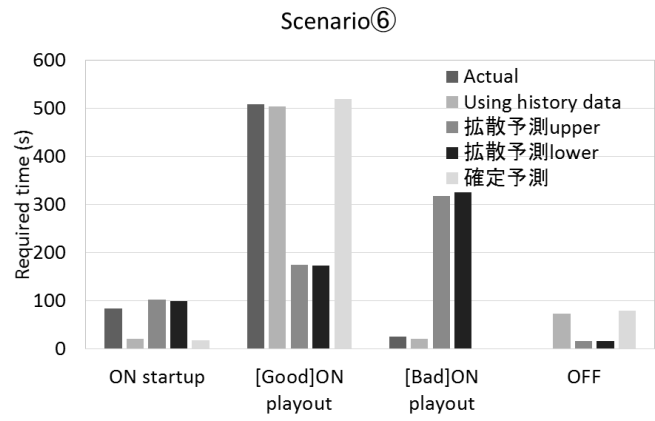


図 4.3.13 (a) 状態所要時間 (s)

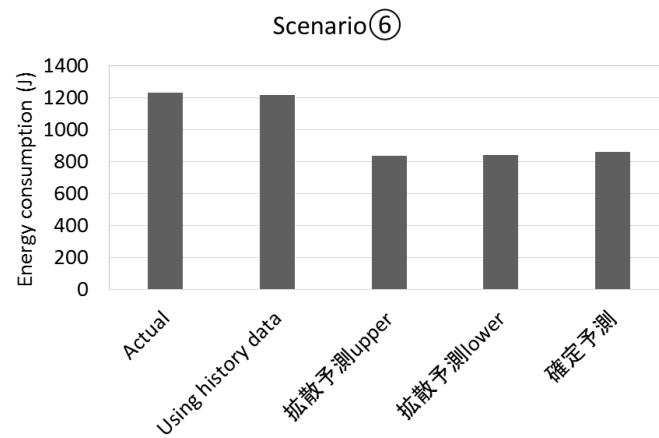


図 4.3.13 (b) 消費電力量 (J)

Scenario⑦

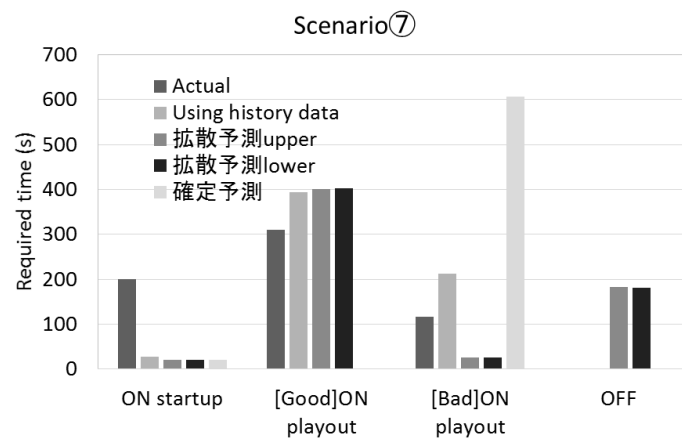


図 4.3.14 (a) 状態所要時間 (s)

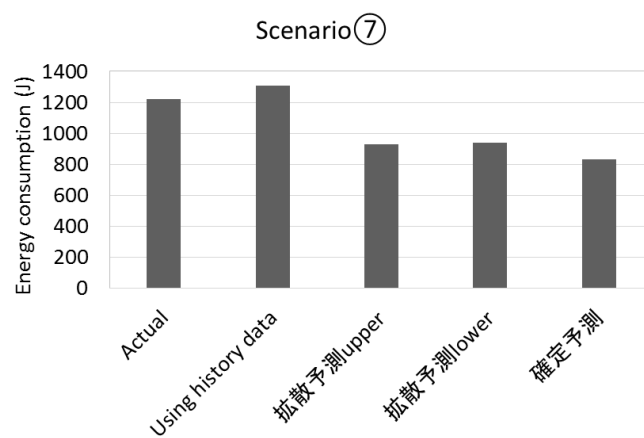


図 4.3.14 (b) 消費電力量 (J)

Scenario⑧

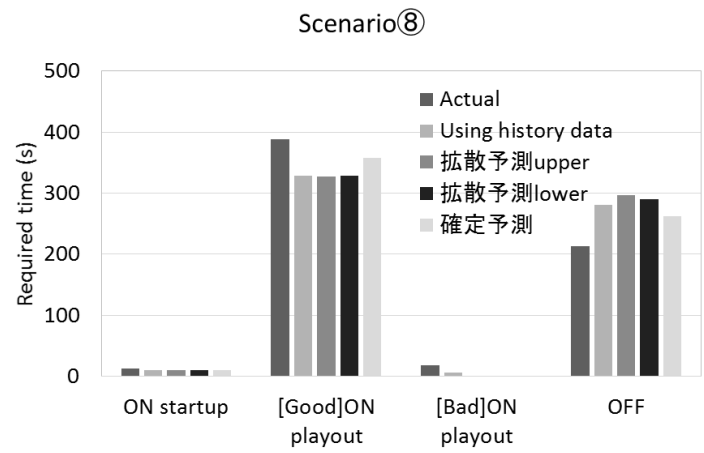


図 4.3.15 (a) 状態所要時間 (s)

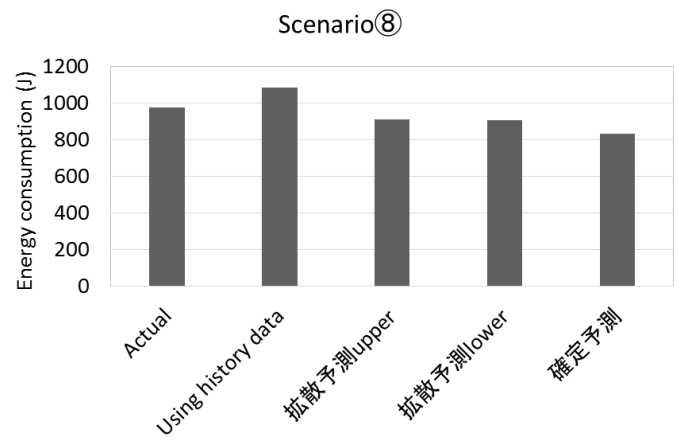


図 4.3.15 (b) 消費電力量 (J)

Scenario⑨

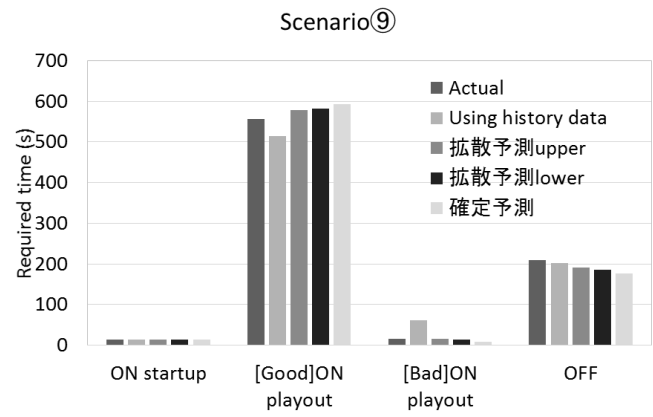


図 4.3.16(a) 状態所要時間 (s)

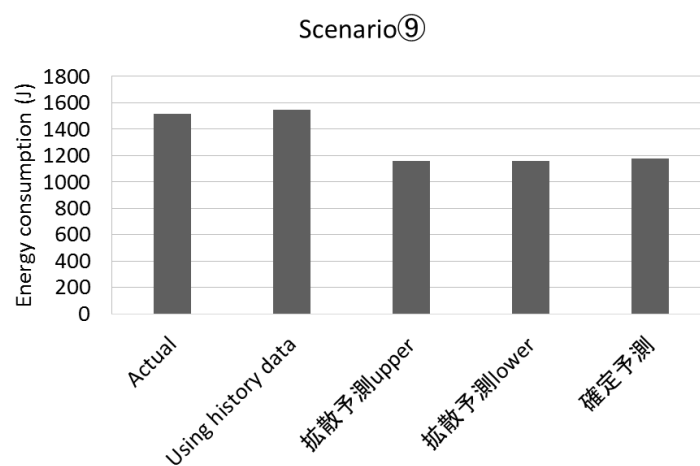


図 4.3.16 (b) 消費電力量 (J)

Scenario⑩

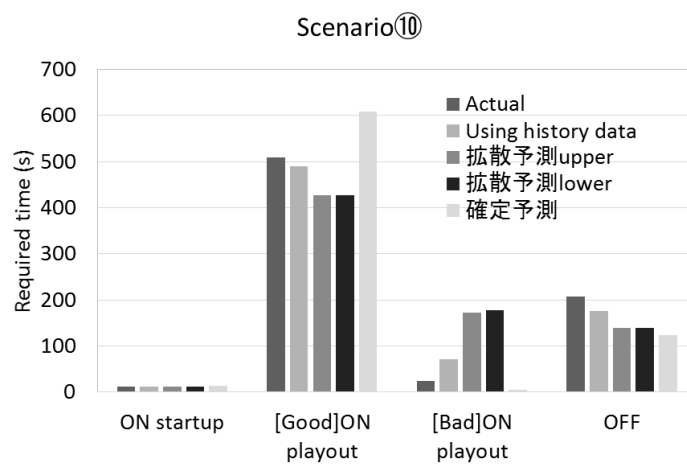


図 4.3.17(a) 状態所要時間 (s)

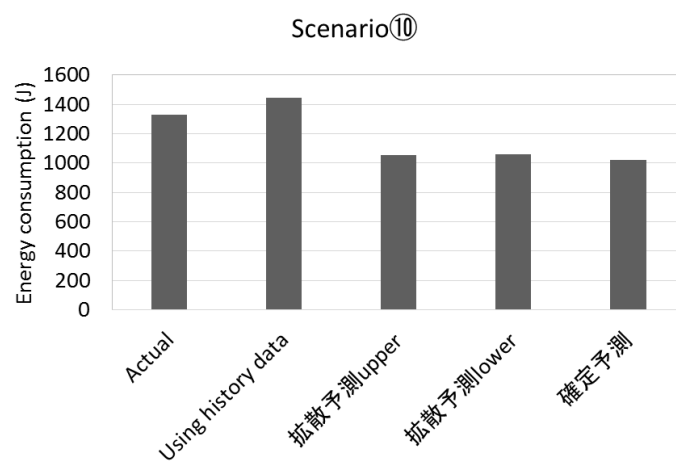


図 4.3.17(b) 消費電力量 (J)

図 4.3.8 から図 4.3.17 の(a)に各状態の所要時間、(b)に消費電力量の評価結果を示す。これらの図を用いて、“実測値”、“過去に観測されたスループット使用時の推定値（図中においては Using history data）”、“確率的拡散予測値 upper 使用時の推定値”、“確率的拡散予測値 lower 使用時の推定値”、“確定的予測値使用時の推定値”の比較を行うことができる。ここでの確率的拡散予測における upper は、図 4.3.3 に示される赤線の上部、lower は下部のスループット予測値を示す。

また、本評価実験では下記の 2 点が前提となっている。

- A) “実測値”と“過去に観測されたスループット使用時の推定値”の誤差は、主に電力モデルと提案モデルによる誤差を示している
- B) “過去に観測されたスループット使用時の推定値”と“確率的拡散及び確定的予測値使用時の推定値”の誤差は、主にスループット予測による誤差を示している

提案モデルの妥当性の検証

A)の前提条件より、“実測値”と“過去に観測されたスループット使用時の推定値”の誤差に着目することで、提案モデルの妥当性の評価を行う。本評価実験の 10 つの評価シナリオにおける消費電力推定値の平均誤差率は、約 10.5%である。この誤差率は、使用するアプリケーションや利用シーンにより許容でいる範囲に留まっていると考える。しかし、各シナリオに着目すると、映像配信を行うシチュエーションにより提案モデルから導出される推定値の誤差が異なることがわかる。例えば、提案モデルから導出される状態所要時間の推定値の誤差は、Scenario①②⑨⑩でそれぞれ、1～50 s、1～55 s、1～46 s、1～48 s となっている。また、提案モデルから導出される消費電力の推定値の誤差率は、Scenario①②⑨⑩でそれぞれ、約 14%、約 26%、約 2%、約 9%となっている。このような評価結果から映像配信を行った時間が短い Scenario①②において、提案モデルによる推定値の誤差が大きいことがわかる。映像の視聴時間が短い場合、実測と推定で、通信速度変動に対するバッファの挙動に差異が生まれてしまうと、状態所要時間において無視できないほどの誤差が生じてしまう。さらに、状態所要時間の誤差が消費電力の誤差を引き起こすこととなる。本提案モデルを用いる際には、上記のような要因で誤差が大きくなることを考慮しなければならない。

スループット予測を用いた提案モデルの応用例

図 4.3.8 から図 4.3.17 には、提案モデルにスループット予測技術を取り入れた応用例も“確率的拡散予測値 upper 使用時の推定値”、“確率的拡散予測値 lower 使用時の推定値”、“確定的予測値使用時の推定値”として同時に示されている。B)の前提より、“過去に観測されたスループット使用時の推定値”と“確率的拡散及び確定的予測値使用時の推定値”を比較することによって、スループット予測による誤差が確認できる。まず、シナリオ①②⑨⑩の“過去に観測されたスループット使用時（図中においては Using history data）”、“確率的拡散予測値 upper 使用時”、“確率的拡散予測値 lower 使用時”、“確定的予測値使用時”の通信速

度変動を図 4.3.18 から図 4.3.21 に示す。

図 4.3.18 から図 4.3.21 より、確率的拡散予測を用いたスループット値は、過去に観測されたスループット値と比較して大きく外れた値を取ることが確認される。また、確定的予測を用いたスループットは、過去に観測されたスループットの分散が大きい程、外れた値を取る。このようなスループット変動を用いて算出した推定値は、図 4.3.8 から図 4.3.17 の様になり、“過去に観測されたスループット使用時の推定値”と比較しても誤差が大きい。

本誤差に大きく影響するパラメータはスループットだけではない。コンテンツビットレートである。コンテンツビットレートとスループットの予測値の比が、比較対象である過去に観測されたスループットと異なるほど、各種推定値の誤差が大きくなる。例えば、Scenario①と Scenario②の確率的拡散予測によるスループット変動の誤差は、ほとんど等しく観測できるにも関わらず、各種推定値誤差は Scenario①の方が小さい。これは、Scenario②においてコンテンツビットレートとスループット予測値の比が、大きく“過去に観測されたスループット使用時”と異なってしまったことが起因する。このようなことから、提案モデルに対し、スループット予測技術を取り入れる場合、以上のことを考慮し、利用しなければならないと言える。

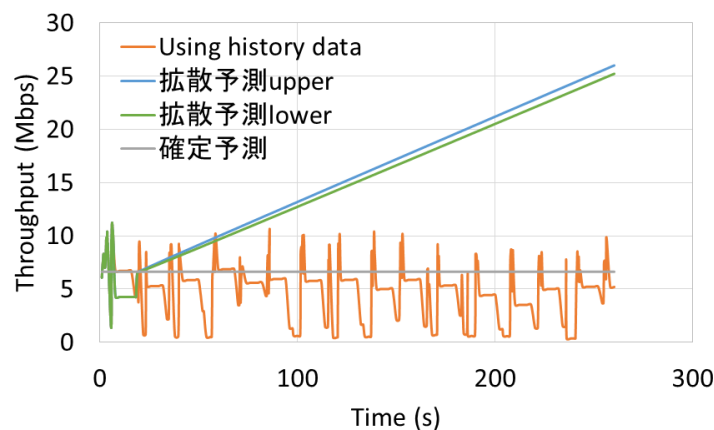


図 4.3.18 Scenario① 各手法から導出されるスループット変動

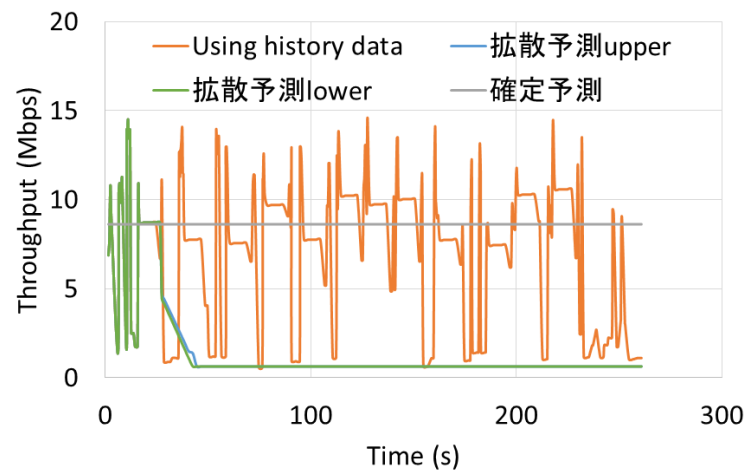


図 4.3.19 Scenario② 各手法から導出されるスループット変動

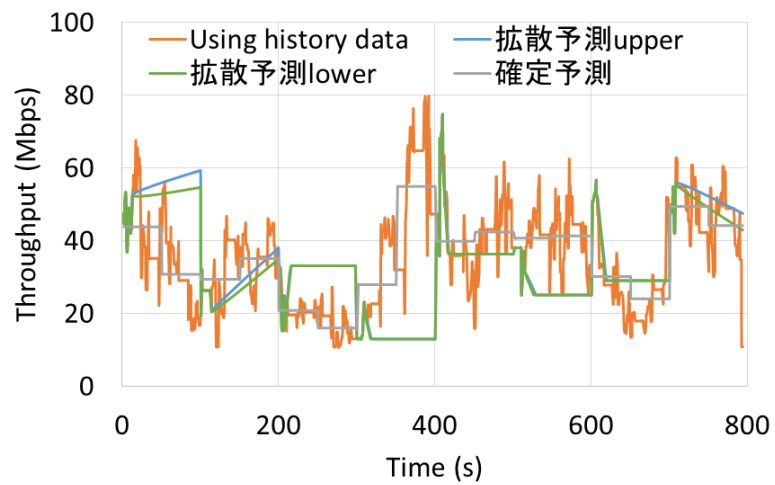


図 4.3.20 Scenario⑨ 各手法から導出されるスループット変動

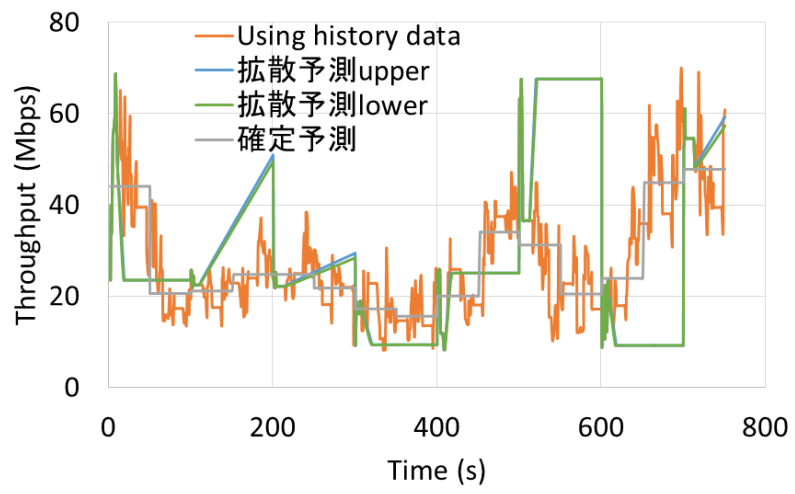


図 4.3.21 Scenario⑩ 各手法から導出されるスループット変動

第5章 省電力映像配信システム

本章では、スループット履歴を活用し、省電力加えて高信頼な映像配信を実現するシステムを提案する。本システムは、主に経路探索及びバッファ制御により構成される。

5.1 コンセプト

本提案システムは、高スループット転送と大容量バッファへのコンテンツ先読みにより消費電力の抑制を実現する。さらに、これら 2 点は再生中断の抑制にも貢献する。

5.1.1 スループット vs 消費電力

省電力を実現する映像配信システムを提案する前に、高スループットが消費電力の抑制に貢献することを確認する。4.3.2 章において受信スループット[Mbps]と 1 Mbit 受信あたりの消費電力量[mJ/Mbit]の関係を示した。図 4.3.4 及び式(4.3.4)(4.3.5)から、高スループットで一定量のデータを受信する場合は、低スループットで受信した場合よりも通信時間が短くなるため、消費電力量が小さくなることがわかる。したがって、スループットが高いほど、電力効率が良くなるということが言える。

5.1.2 バッファ vs 消費電力

高スループット転送に加え、3.3.2 章で示される通り、[17][40]によりクライアントの再生バッファの容量が、映像配信の消費電力に影響することが明らかになっている。図 3.5.3 のように、バッファサイズの上限と下限の差を大きくとると、OFF phase つまり非通信時間が長くなり消費電力が抑えられる。

さらに、バッファ容量拡大による省電力効果の推定値を、4 章で示した”LTE 通信時の状態を考慮した電力モデル”と”提案した消費電力推定モデル”を活用して導出する。省電力効果を導出する際に用いるパラメータを表 5.1.1 に示す。但し、想定する通信速度及びコンテンツビットレートは常に一定とする。

ここでは、拡大したバッファ容量を用いて映像配信をした際の消費電力量 E_{large} から、デフォルトのバッファ容量を用いて映像配信をした際の消費電力量 E_{small} を減算した値を省電力効果とし、その値が大きい程、省電力であるとする。さらに省電力効果は、**スループット・ビットレート**、**バッファサイズ**に依存し変化する。

表 5.1.1 バッファ容量拡大による省電力効果導出のためのパラメータ

Parameter	Definition
Th (Mbps)	スループット値
$B_{l\ arg\ e}$ (s)	拡大後のバッファ容量 ($B_{\max} - B_{\min}$)
B_{small} (s)	拡大前のバッファ容量 ($B_{\max} - B_{\min}$)
B_{\min} (s)	デフォルトのバッファ下限
R (Mbps)	コンテンツビットレート
k (s)	セグメント分割間隔
$\overline{P_{tail}}$ (mW)	Tail 状態平均電力
$\overline{P_{idle}}$ (mW)	Idle 状態の平均電力
Δt_{tail} (s)	Idle 状態の時間
t_{total} (s)	視聴時間
Δt_{S1} (s)	1 サイクル目の ON startup phase 所要時間

A) 映像配信をするネットワークのキャパシティがコンテンツビットレートより大きい時
($Th > R$)

$E_{large} - E_{small}$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(Th - R)(t_{total} - \Delta t_{ON_startup})\Delta t_{tail}}{Th(B_{l\ arg\ e} - B_{\min\ l})(B_{small} - B_{\min})} (\overline{P_{tail}} - \overline{P_{idle}})(B_{l\ arg\ e} - B_{small}) \\
 &= \frac{(Th - R)}{Th} \times \frac{(B_{l\ arg\ e} - B_{small})}{(B_{l\ arg\ e} - B_{\min\ l})(B_{small} - B_{\min})} \times N \\
 &= \boxed{\frac{(Th - R)}{Th}} \times \boxed{\frac{(\Delta B_{l\ arg\ e} - \Delta B_{small})}{\Delta B_{l\ arg\ e} \Delta B_{small}}} \times N \\
 &\quad (B_{small} - B_{\min} > \Delta t_{tail} \text{ の時}) \tag{5.1.1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{t_{total} - \Delta t_{ON_startup}}{Th(B_{l\ arg\ e} - B_{\min\ l})} (\overline{P_{tail}} - \overline{P_{idle}})(B_{l\ arg\ e} - B_{\min} - \Delta t_{tail}) \\
 &= \frac{1}{Th} \times \frac{(B_{l\ arg\ e} - B_{\min} - \Delta t_{tail})}{(B_{l\ arg\ e} - B_{\min\ l})} \times N \\
 &= \boxed{\frac{1}{Th}} \times \boxed{\frac{(\Delta B_{l\ arg\ e} - \Delta t_{tail})}{\Delta B_{l\ arg\ e}}} \times N \\
 &\quad (B_{small} - B_{\min} \leq \Delta t_{tail} \text{ の時}) \tag{5.1.2}
 \end{aligned}$$

B) 映像配信をするネットワークのキャパシティがコンテンツビットレート以下の時
($Th \leq R$)

上記の条件下では、バッファの上限に達することがなく **OFF phase** にならない。従ってバッファの上限によらず消費電力量は $\overline{P(x)} \times t_{total}$ J となり、省電力効果は得られない。

式(5.1.1)(5.1.2)を用いて導出される省電力効果の推定値を評価するために、実測値との比較を行った結果を図 5.1.1 に示す。推定値は下記のシナリオと同様の映像配信を行うものと想定して、パラメータを設定し、導出される。但し、実測値は NDN 環境、推定値は IP ネットワーク環境を想定している。

評価シナリオ([40]に示される実験結果”Actual”を実測値として引用している)

ビットレート：1 Mbps

視聴時間：150 s

無線規格：LTE(早稲田大学 55 号館 N 棟 6 階) 9.2Mbps

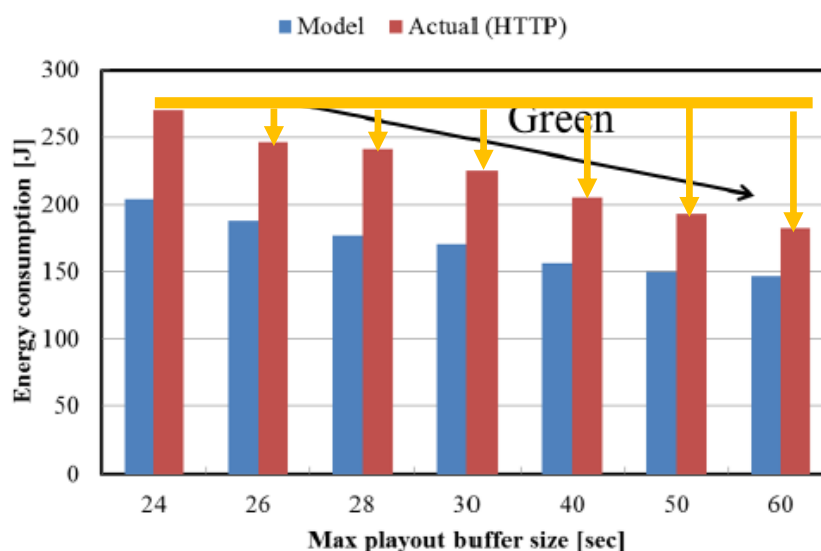


図 5.1.1(a) 映像配信時の消費電力量の実測値と省電力効果[40]

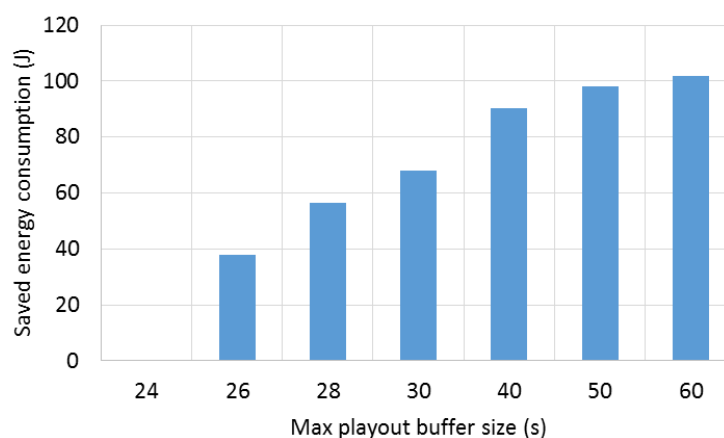


図 5.1.1 (b) 式(5.1.1)(5.1.2)を用いて導出される省電力効果の推定値

図 5.1.1 (a)に、映像配信した際の消費電力量の実測値(赤棒グラフで示される Actual)、図 5.1.2(b)に式(5.1.1)(5.2.1)により導出した省電力効果の推定値を示す。省電力効果の実測値は図 5.1.1(a)中の黄色の矢印で示される部分である。この部分と図 5.1.1(b)の推定値を比較すると、推定値は、実測値と比較して IP ネットワーク環境と NDN 環境という点が起因して数 J 大きく見積もられているが、誤差は小さく、妥当な値を示していることがわかる。

5.1.3 再生中断時間の抑制

本提案システムは、消費電力に加え、再生中断も抑制することができる。高スループット転送により強固なネットワークが実現し、高ビットレートコンテンツをスムーズに視聴することが可能である。加えて、大容量バッファへのコンテンツ先読みにより得られた OFF phase 期間中に発生する可能性のある再生中断を防ぐ。

5.2 提案システム概要

提案システムは、経路探索及び、バッファ制御により省電力加えて高信頼な映像配信を実現する。図 5.2.1 に提案システム概略図を示す。本システムは 4 つのステップで構成される。

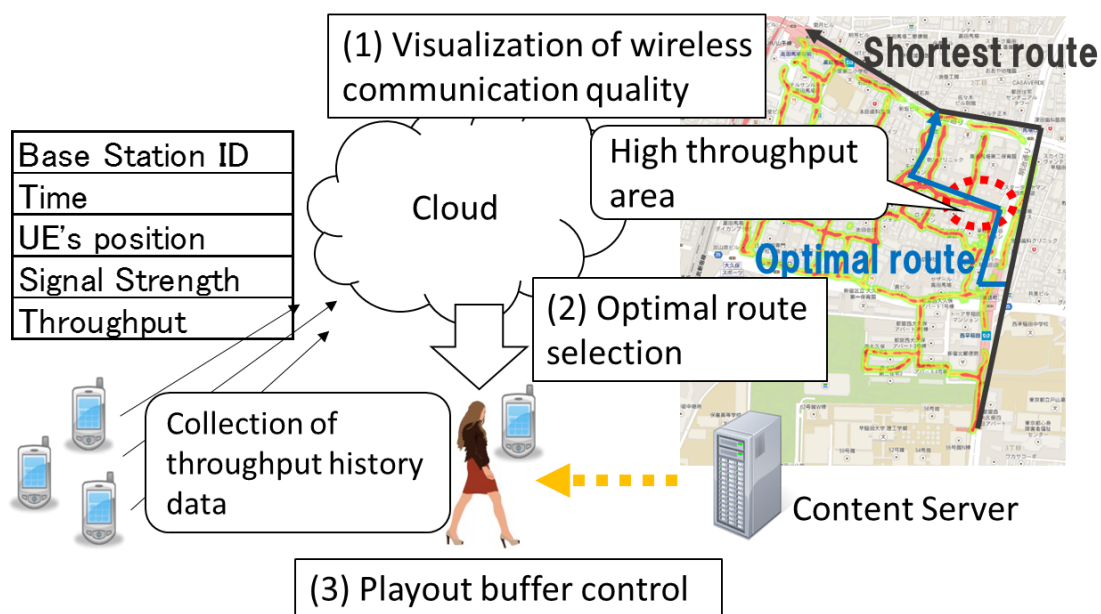


図 5.2.1 提案システム概略図

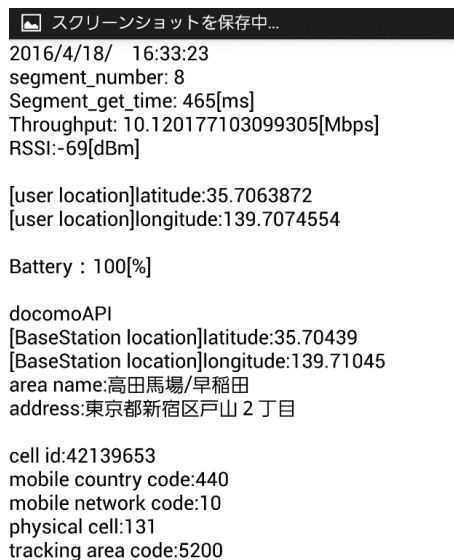
- ① スループット履歴の収集
- ② 無線ネットワーク品質の可視化
- ③ 経路探索
- ④ バッファ制御

5.3 スループット履歴の収集

本項目では、スマートフォン端末を用いてスループット履歴の収集を行う。収集するパラメータはスループットに加え、現在時刻、端末の位置情報、受信電波強度、Cell ID とする。これらデータの収集は Android アプリケーションによって行われる。

5.3.1 スループット履歴収集アプリケーション

スループット履歴を収集するために、Eclipse 上で Android SDK によりアプリケーションを実装する。スループット及びその他データを 1 秒間に 1 度計測し、図 5.3.1 に示すような画面の表示とテキストファイルへのログデータ出力を行う。



スクリーンショットを保存中...

2016/4/18/ 16:33:23
segment_number: 8
Segment_get_time: 465[ms]
Throughput: 10.120177103099305[Mbps]
RSSI: -69[dBm]

[user location]latitude:35.7063872
[user location]longitude:139.7074554

Battery : 100[%]

docomoAPI
[BaseStation location]latitude:35.70439
[BaseStation location]longitude:139.71045
area name:高田馬場/早稲田
address:東京都新宿区戸山 2 丁目

cell id:42139653
mobile country code:440
mobile network code:10
physical cell:131
tracking area code:5200

図 5.3.1 スループット履歴収集アプリケーション

本アプリケーションでは、図 4.3.3 に示す環境で、コンテンツ配信サーバから[44]で提供されている 2K 動画 BigbuckBunny のセグメントを取得した時のスループットを計測する。

5.3.2 対象エリア

作成した Android アプリケーションを用いて、平日の 14:00～15:30 に早稲田大学周辺(図 5.3.2)でスループット履歴を収集する。対象エリア内を徒歩で移動しながら各パラメータをスマートフォン端末の Galaxy S4 を用いて 1 秒間に一度計測する。



図 5.3.2 スループット履歴収集対象エリア

5.4 無線ネットワーク品質マップの作成

収集したスループット履歴を基に、対象エリアの無線ネットワーク品質をヒートマップとして可視化する。可視化マップは、ユーザの位置情報とスループットを用いて JavaScript の Google API により作成する。作成した無線ネットワーク品質の可視化マップを図 5.4.1 に示す。



図 5.4.1 無線ネットワーク品質の可視化マップ

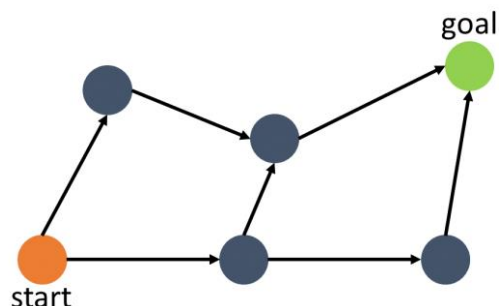
5.5 経路探索

本章では、収集したスループット履歴及び無線ネットワーク品質マップを用いた経路探索アルゴリズムを提案する。今回は、経路探索の目的関数を“平均スループット最大化”とし、さらに移動経路の候補を早稲田大学西早稲田キャンパスから高田馬場駅までの経路とする。

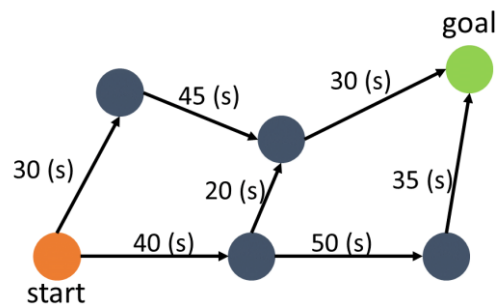
経路探索を行うために、収集したスループット履歴を基に、下記の方法で無線信号グラフを作成する。まず、対象エリアを図 5.5.1(a)のように交差点をノード、交差点同士を接続する道路をエッジとしてグラフ化する。次に、各エッジ上で収集したスループット履歴からそれらの平均を算出することで、エッジ上で通信した際の推定スループットを導出する。このスループットの推定値を図 5.5.1(b)のように各エッジにパラメータとして持たせる。次に、エッジ両端のノードの位置情報から、エッジの長さを算出し、ユーザの移動速度を[45]をもとに1.4 m/sに設定した場合の移動時間を推定する。この移動時間の推定値を図 5.5.1(c)のように各エッジにパラメータとして持たせる。最後に、エッジに持たせたスループットと移動時間を乗算することで、このエッジ上を移動しながら通信した際の受信データ量の

推定値を算出し、他のパラメータと同様に図 5.5.1(d) のように各エッジにパラメータとして持たせる。

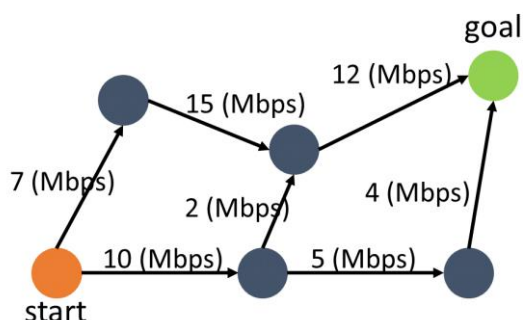
このような過程を通して、移動経路候補を抽象化し、各エッジにスループット、移動時間、データ受信量をパラメータに持つ無線信号グラフを作成する。



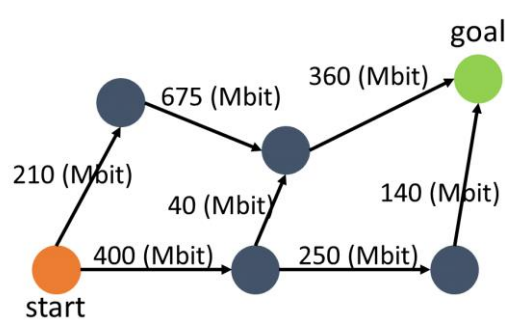
(a) 地理情報のグラフ化



(b) 移動時間のマッピング



(c) スループットのマッピング



(d) データ受信量のマッピング

図 5.5.1 無線信号グラフの構築例

構築した無線信号グラフと式(4.3.5)を用いて、早稲田大学西早稲田キャンパスから高田馬場駅までを対象とした全移動経路の映像配信時の QoS パラメータ”移動時間”、”スループット”、”映像セグメントを 1 秒分受信した際の消費電力量”、”ボトルネック”の推定値を算出する。以降、各パラメータの算出方法を示す。但し、ここでは、経路探索を簡単化するため、バッファリングは考慮していない。

A) 移動時間

各経路の移動時間は、ノード同士を接続するエッジが持つパラメータである移動時間の和とする。

B) スループット

各経路で移動中に映像配信を行った際の平均スループットは、ノード同士を接続するエッジが持つパラメータである受信データサイズの和を経路の移動時間で除算した時の商とする。

C) 消費電力(固定レート映像配信時)

各ビットレートの映像セグメント 1 秒分を受信した際の消費電力は、ノード同士を接続するエッジ上で映像セグメントを受信した際の消費電力の和を、経路全体で取得した総セグメント数により算出できる映像再生可能な時間で除算した時の商とする。

ただし、エッジのスループットが取得する動画のビットレートより大きい場合、1 秒間に取得できるデータ量はビットレートと等しくなり、また、スループットがビットレートより小さい場合、1 秒間に取得できるデータ量はスループットと等しくなる。この 1 秒間に取得できるデータ量とスループットから式(4.1.2)を用いて、エッジ上で動画セグメントを受信した際の消費電力を算出する。

D) ボトルネック(固定レート映像配信時)

ボトルネックは、経路上で観測されるスループットの最小値とする。

以上の方法で全経路上における映像配信時の QoS パラメータを算出し、その結果を図 5.5.2、図 5.5.3 に示す。また、図 5.5.2、図 5.5.3 のルート ID はスループットの大きい順にソートしてあり、図 5.5.3 の消費電力推定に用いる動画のビットレートは、1、3、7、10 Mbps を想定する。また、図中の青矢印で示される経路はスループット最大化経路、緑矢印で示される経路は最短経路である。

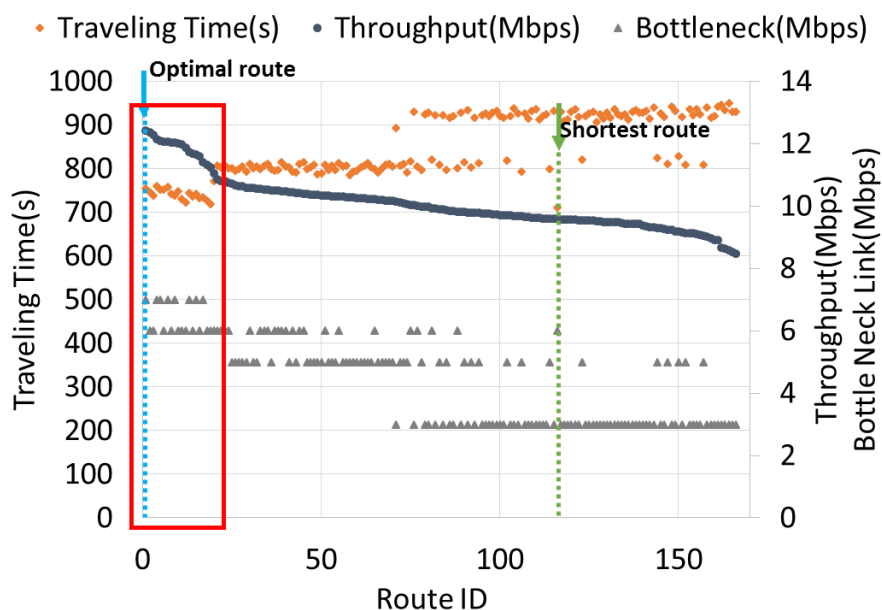


図 5.5.2 全経路上の移動時間、平均スループット、ボトルネックの推定結果

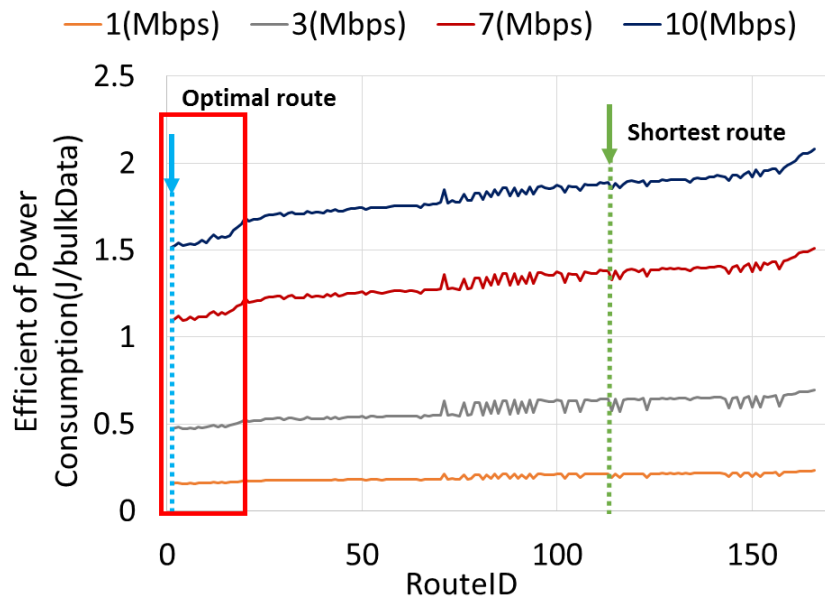


図 5.5.3 全経路上の各ビットレートにおける
映像セグメント 1 秒を受信した際の推定消費電力

図 5.5.2 に、高スループットを実現する経路群を赤枠で示す。これらの経路は、高スループットであることに加え、移動時間が短いという特徴も共通しているが、ボトルネックは経路により異なる。平均スループットの大きい経路でも、極端にスループットの低いエリアを通る場合は、高品質な動画を配信すると再生が停止するという特徴を持つことが確認できる。

図 5.5.3 に、省電力を実現する経路群を赤枠で示す。この図から、取得する映像のビットレートが大きくなるほど、赤枠で囲まれる経路は、他の経路と比較して、電力効率が良くなることが確認できる。赤枠で囲まれる経路は、平均スループットの高い経路であり、通信時間削減が実現されることで、省電力な映像配信を行うことができる。

図 5.5.2、図 5.5.3 から、赤枠で囲まれる経路群は高スループットで省電力な映像配信が実現できる経路であることが推定できる。したがって、今回の目的関数であるスループット最大化経路を選択することで、省電力も同時に実現できることが確認された。

本経路探索の目的関数であるスループット最大化経路は、図 5.5.2、図 5.5.3 に示すルート ID : 1 の経路である。本経路を **Optimal route** とする。また、提案経路の評価をする上で、比較対象として従来のサービスの一つである Google Maps[46]が提供する最短経路 **Shortest route** を用意する。Optimal route 及び Shortest route を図 5.5.4 に示す。



図 5.5.4 Optimal route 及び Shortest route

5.6 バッファ制御

収集されたスループット履歴により移動経路上の高スループットエリアの検出を行い、その地点で高速なコンテンツの先読みを拡張したバッファの最大限まで行うことで、省電力加えて高信頼な映像配信を実現するバッファ制御を提案する。提案バッファ制御を図 5.6.1 に示す。

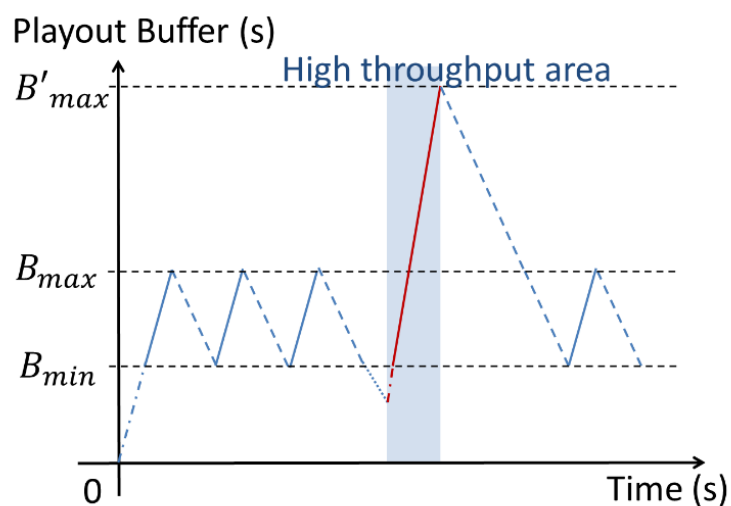


図 5.6.1 提案バッファ制御

図 5.6.1 に示すように、基本的にユーザが移動している際は、従来と同様のバッファ制御を行う。高スループットエリアでは、ユーザが許容する時間の限り立ち止まり、一時的にバッファ容量を拡大して映像セグメントを溜める。その後の移動は、バッファに溜められたビデオセグメントを消費し、デフォルトのバッファ制御に戻る。提案手法の効果は、経路における通信速度の変動が影響することが予測される。

図 5.5.4 に示す経路のスループットを 5.3.1 章の Android アプリケーションにより計測し、その分布を図 5.6.2 に示す。本図より、Optimal route 上にはスループットが著しく高いエリアが存在することが確認できる。対象エリアにおけるシステム評価実験では、この高スループットエリアにおいて大容量バッファへのコンテンツ先読みを行うものとする。

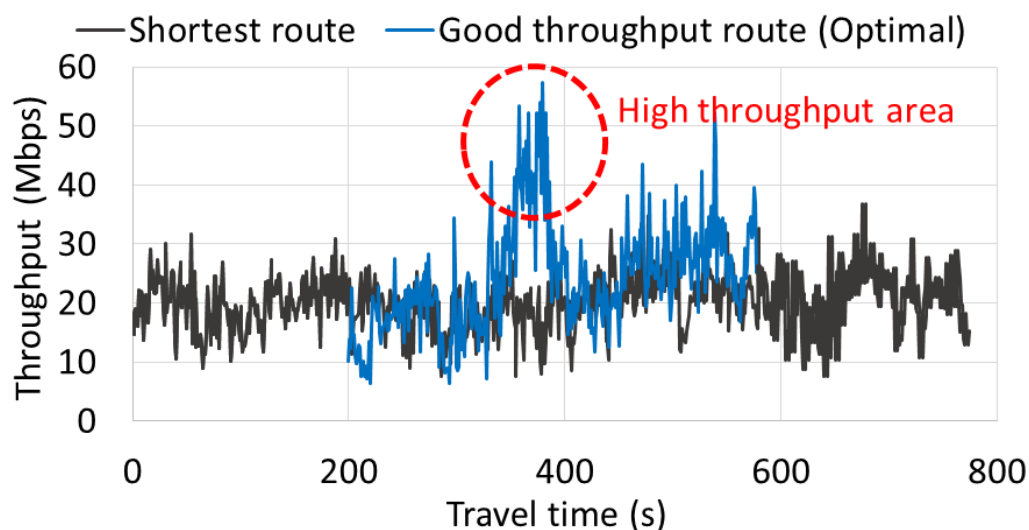


図 5.6.2 Optimal route と Shortest route のスループット分布

5.7 提案バッファ制御における省電力効果推定モデル

本手法は高スループットエリアでの滞在時間を設けること、つまり移動時間の増加と引き換えに、映像配信の省電力化、高信頼化を実現するものである。そこで、提案バッファ制御による移動時間の増加と再生中断時間、消費電力の抑制効果をモデル化する。本モデル化に用いるパラメータを表 5.7.1 に示す

表 5.7.1 映像配信モデルパラメータ

Parameter	Definition
Th_i (Mbps)	i 番目のセグメント取得時のスループット値
Th_{max} (Mbps)	高スループットエリアスループット
B_{max} (s)	デフォルトのバッファ下限
B_{min} (s)	デフォルトのバッファ下限
B'_{max} (s)	コンテンツ先読み時のバッファ上
$B(t)$	時間 t 後のバッファ容量
R_i (Mbps)	I 番目の動画のビットレート
$k(s)$	セグメント分割間隔

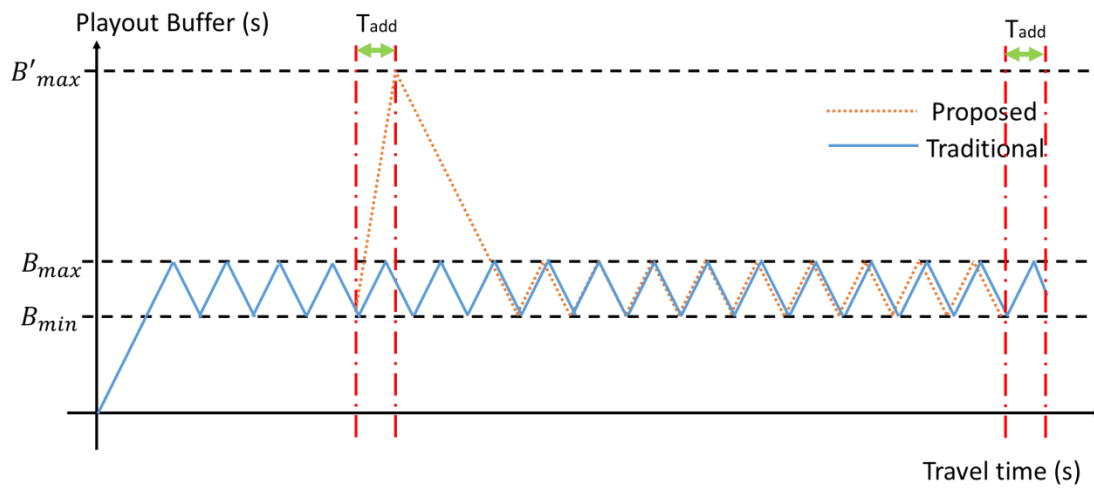


図 5.7.1 提案バッファ制御における移動時間とバッファサイズの関係

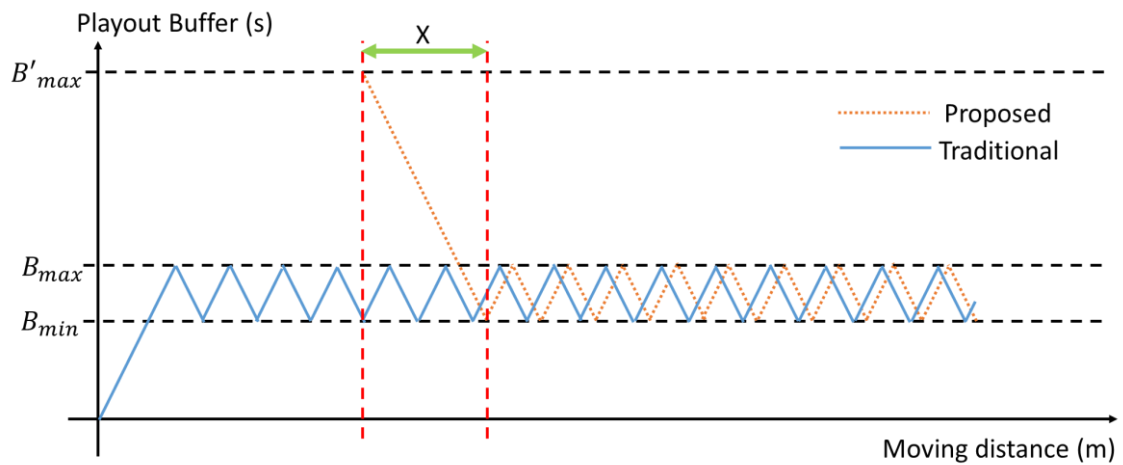


図 5.7.2 提案バッファ制御における移動距離とバッファサイズの関係

4 章で提案したモデルを基に提案システムの消費電力の抑制効果を算出するために、図 5.7.1 の移動時間とバッファサイズの関係、図 5.7.2 の移動距離とバッファサイズの関係を用いる。提案バッファ制御は、高スループットエリアにおいて、大容量バッファにコンテンツ先読みを高速で行うことによって消費電力を抑える。従って、省電力効果は、図 5.7.2 の X の期間の従来のバッファ制御における消費電力から提案バッファ制御における消費電力を減算することで求められる。

X 期間に視聴する分のセグメント数は、

$$\frac{B'_{\max} - B_{\min}}{k}$$

従来のバッファ制御の 1 サイクル視聴する分のセグメント数は、

$$\frac{B_{\max} - B_{\min}}{k}$$

従来のバッファ制御における X 期間のサイクル数は

$$\frac{B'_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}}$$

となる。これを前提に提案バッファ制御による移動時間の増加と再生中断時間、消費電力の抑制効果をモデル化する。

① 移動時間の増加

図 5.7.1 中の T_{add} が提案バッファ制御による移動時間の増加を示している。 T_{add} は、高スループットエリアに到着した際の映像配信の状態により変化する。

A) ON startup phase で高スループットエリアに到着した場合

$$\Delta t'_{s1} + \Delta t'_{s2} = \frac{(B_{\min} - B(t)) \times R}{Th_{\max}} + \frac{(B'_{\max} - B_{\min}) \times R_{\max}}{Th_{\max} - R_{\max}} \quad (5.7.1)$$

B) ON playout phase 又は OFF phase で高スループットエリアに到着した場合

$$\Delta t'_{s2} = \frac{(B'_{\max} - B(t)) \times R_{\max}}{Th_{\max} - R_{\max}} \quad (5.7.2)$$

② 再生中断時間抑制効果

図 5.7.1 中の X 期間中に現れる提案バッファ制御を起用しなかった際に起こる再生停止を抑制することができる。

③ 消費電力抑制効果

上記で述べた通り、提案バッファ制御における省電力効果は、図 5.7.2 の X の期間の従来のバッファ制御における消費電力から提案バッファ制御における消費電力を減算することで求められる。従って、提案バッファ制御における省電力効果は、式(5.7.3)のように表される。

$$\left(\frac{B'_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}} \times E_{S4} + \frac{\frac{B_{\max} - B_{\min}}{k} \times \frac{B'_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}}}{\sum_{i=1}^k E_{S2}} \right) - \left(E'_{S4} + \sum_{i=1}^k \frac{B'_{\max} - B_{\min}}{P(Th_{\max})} \times \frac{k \times R_{\max}}{Th_{\max} - R_{\max}} \right) \quad (5.7.3)$$

式(5.7.3)を整理すると、式(5.7.4)となる。

$$\left(\frac{B'_{\max} - B_{\max}}{B_{\max} - B_{\min}} \right) (\overline{P_{tail}} - \overline{P_{idle}}) \Delta t_{tail} + k \left(\sum_{i=1}^k \frac{B'_{\max} - B_{\max}}{P(Th_i)} \times \frac{R_i}{Th_i - R_i} - \sum_{i=1}^k \frac{B'_{\max} - B_{\max}}{P(Th_{\max})} \times \frac{R_{\max}}{Th_{\max} - R_{\max}} \right) \quad (5.7.4)$$

提案バッファ制御の省電力効果は式(5.7.4)で表される。但し、再生中断発生後の ON startup phase は、通信品質が悪く R_i が最小を取る想定で、ON playout phase と同様として近似している。式中有る項からもわかる通り、本提案バッファ制御の、**大容量バッファへのコンテンツ先読み**と**高スループット転送**により省電力効果が得られることが確認される。

は、 $\frac{B'_{\max} - B_{\max}}{k}$ つのセグメントを受信するのにかかる時間を表しており、DASH 配信で本システムを使用する際、省電力効果が得られるレプリゼンテーションを決定する要因となる。

第6章 提案システムの評価

本章では、第5章で提案した、省電力加えて高信頼映像配信システムの有効性を示すため、シミュレーションにより映像配信時の下記のパラメータを評価する。次に、Wi-Fi環境を用いて帯域幅を変動させ、シミュレーションと同様の通信速度変動をエミュレートし、研究室内実験評価を行う。最後に、フィールド実験評価を行う。

シミュレーション、実験共に、固定レート配信、DASH配信時の高スループットエリア滞在時間と再生中断時間、消費電力を評価する。さらにDASH配信では、平均ビットレートの評価も行う。

6.1 シミュレーション及び研究室内実験

提案システムの有効性を示すため、シミュレーション及び研究室内実験により映像配信特性評価を行う。

6.1.1 評価環境

図5.6.2に示されるような通信品質変動を参考に、図6.1.1のような通信品質変動を作成し、表6.1.1のシミュレーション・研究室内実験パラメータを設定する。スループット x に対する消費電力及びTail電力、Idle電力、Tail電力出現時間は4.3章で示したLTE通信時の状態を考慮した電力モデル[43]を基に設定されている。さらに、図5.6.2のOptimal routeでは、高スループットエリア以外の平均スループットが約20 Mbps、高スループットエリアのスループットが約50 Mbpsであるため、図6.1.1のように単純化を行った。作成した通信品質変動環境下で本システムを用いて映像配信を行った際の固定レート配信、DASH配信時の高スループットエリア滞在時間と再生中断時間、消費電力を評価する。さらにDASH配信では、平均ビットレートの評価も行う。

シミュレーション評価では、作成した通信品質変動から4章で提案したモデル式である式(4.2.1)から式(4.2.12)と4.3章で示したLTE通信時の状態を考慮した電力モデル[43]を用いて、上記評価項目の理論値を算出する。

研究室内実験では、図4.3.3に示すような実験環境で、Wi-Fiを用いて作成した通信品質変動を疑似的に再現した時の映像配信特性評価を行う。スマートフォン上で動画配信を行うために、DASH-JSによるコンテンツ配信サーバを早稲田大学内に設置する。コンテンツ配信サーバは、UbuntuによるデスクトップPCであり、クライアント端末はスマートフォンのGalaxy S4を用いる。配信される映像は、[44][43]により提供される4K動画の”Tears of Steel”をH.264/AVCにより予め圧縮したものとする。コンテンツ配信サーバとクライ

アント端末間の通信は Wi-Fi (IEEE802.11n)を使用し、作成した通信品質変動を Linux で実装されている tc コマンドによってエミュレートする。また、評価項目である消費電力は、スマートフォンに Monsoon Power Monitor を接続し、計測する。但し、Wi-Fi 環境におけるスマートフォン端末の電力の挙動には、通信後の Tail 電力が見られない。したがって、研究室内実験で評価される消費電力は、シミュレーション評価と比較して Tail 電力が見られない分、抑制効果が低くなることが予測される。

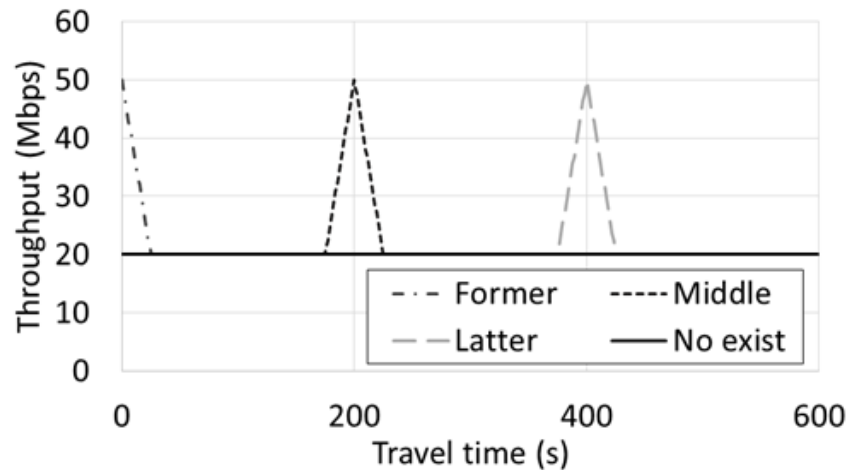


図 6.1.1 想定される移動経路の通信品質変動

表 6.1.1 シミュレーション・研究室内実験パラメータ

Parameter	Value
移動時間 (s)	600
デフォルトのバッファ上限 (Bmax) (s)	30
デフォルトのバッファ下限 (Bmin) (s)	20
高スループットエリアで拡大するバッファの上限 (B'max) (s)	60, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600
コンテンツビットレート (Mbps)	10, 20, 30, DASH(10, 20, 30)
セグメント分割単位 (s)	2
スループット x に対する消費電力 (mW)	$P_x = 967.706x^{0.14} + 604$
Tail 電力 (mW)	1850
Idle 電力 (mW)	1000
Tail が見られる時間 (s)	3.63

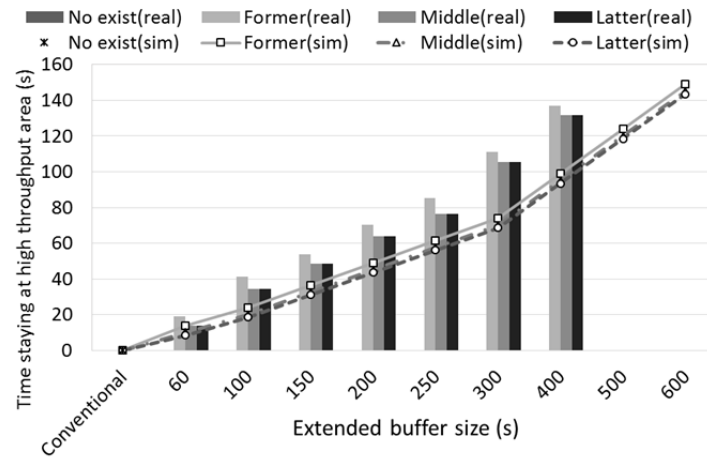
6.1.2 評価シナリオ

経路上に存在する高スループットエリアの出現場所によるシステム性能評価を行うため、下記 4 シナリオ(図 6.1.1)で評価を行う。

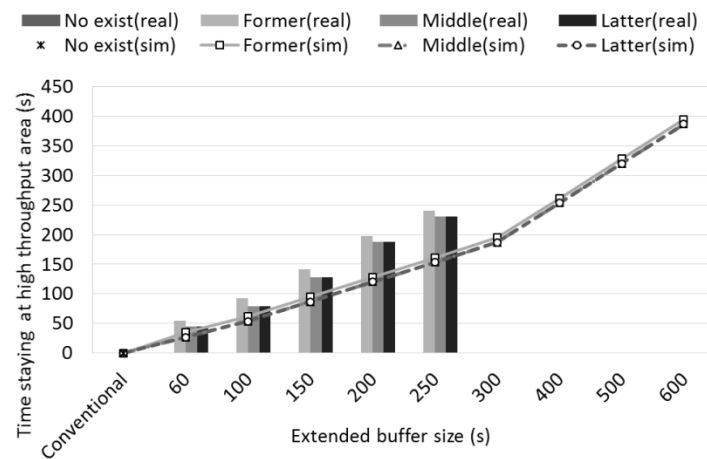
- A) **No exist** : 高スループットエリアが移動経路上に存在しないシチュエーションを想定したシナリオである。したがって、バッファ容量を拡大させることはなく、常にデフォルトのバッファ制御を繰り返す。本シナリオを一般的なユーザ端末の挙動とする。
- B) **Former** : 高スループットエリアが移動経路上の前半に存在するシチュエーションを想定したシナリオである。したがって、ユーザは、移動時間の前半でバッファ容量を拡大、コンテンツ先読みをすることで、他 3 シナリオと比較して長い時間通信せず映像を視聴することが可能である。本シナリオにおけるバッファ容量は、高スループットエリアにおいて以降の移動時間である 600 s まで最大で拡大することができる。
- C) **Middle** : 高スループットエリアが移動経路上の中盤に存在するシチュエーションを想定したシナリオである。したがって、ユーザは、移動時間の中盤でバッファ容量を拡大、コンテンツ先読みをすることで、No exist 及び Latter と比較して長い時間通信せず映像を視聴することが可能である。本シナリオにおけるバッファ容量は、高スループットエリアにおいて以降の移動時間である 400 s まで最大で拡大することができる。
- D) **Latter** : 高スループットエリアが移動経路上の後半に存在するシチュエーションを想定したシナリオである。したがって、ユーザは、移動時間の後半でバッファ容量を拡大、コンテンツ先読みをすることで、No exist と比較して長い時間通信せず映像を視聴することが可能である。本シナリオにおけるバッファ容量は、高スループットエリアにおいて以降の移動時間である 200 s まで最大で拡大することができる。

6.1.3 評価結果

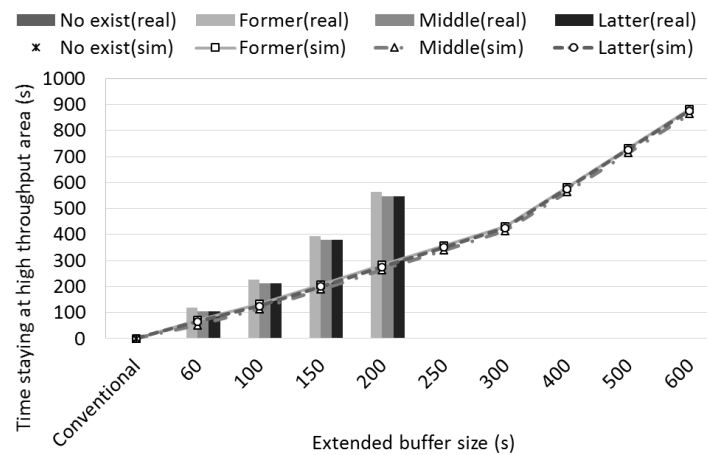
図 6.1.2(a)(b)(c)(d)に各ビットレート、DASH 映像配信時の高スループットエリア滞在時間、図 6.1.3(a)(b)にビットレート 20、30 Mbps 映像配信時の再生中断時間、図 6.1.4(a)(b)(c)(d)に各ビットレート、DASH 映像配信時の消費電力、図 6.1.5 に DASH 配信時の平均ビットレートを示す。実機実験では、DASH-JS の制約により B'_{max} は R が 10Mbps の時、最大 400s まで、R が 20Mbps の時、最大 250s まで、R が 30Mbps 及び DASH 配信の時、最大 200s までの計測とする。



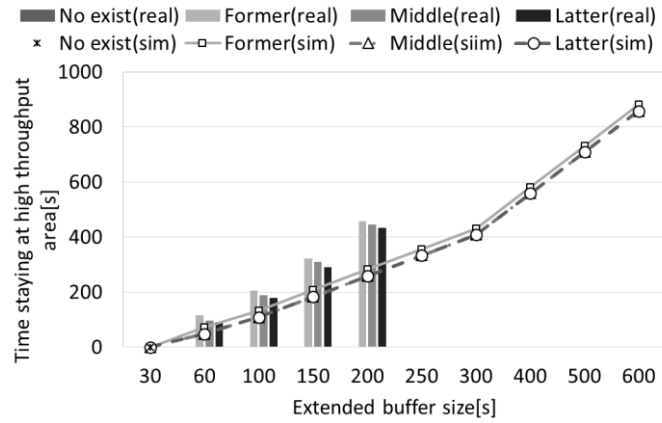
(a) ビットレート 10 Mbps の場合



(b) ビットレート 20 Mbps の場合



(c) ビットレート 30 Mbps の場合

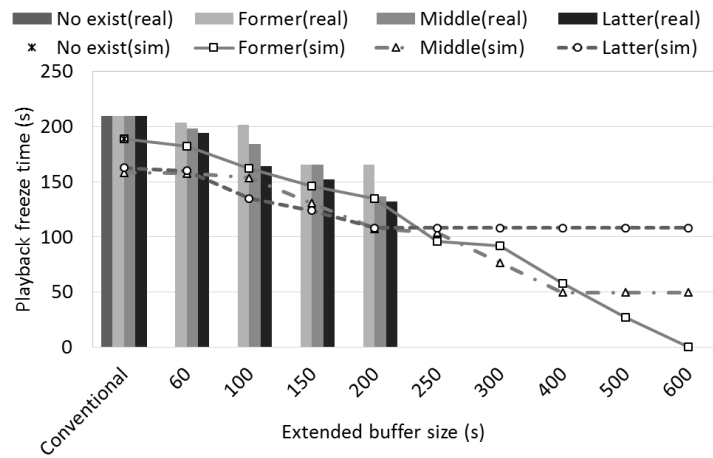


(d) DASH 配信の場合

図 6.1.2 高スループットエリア滞在時間評価結果

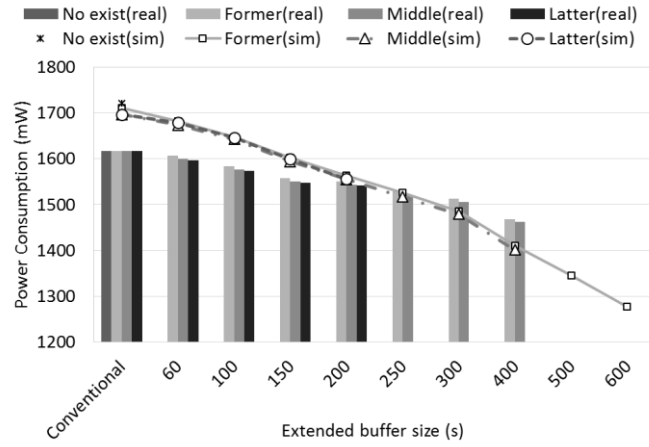


(a) ビットレート 20 Mbps の場合

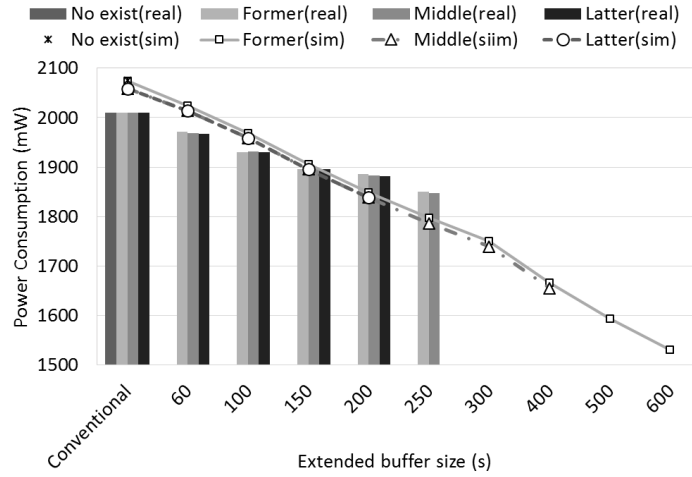


(b) ビットレート 30 Mbps の場合

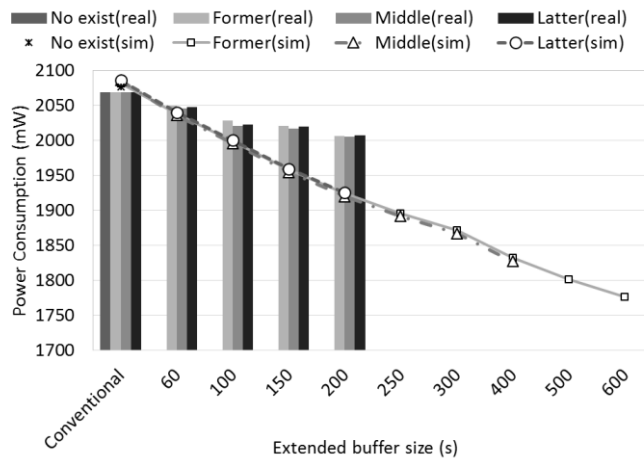
図 6.1.3 再生中断時間評価結果



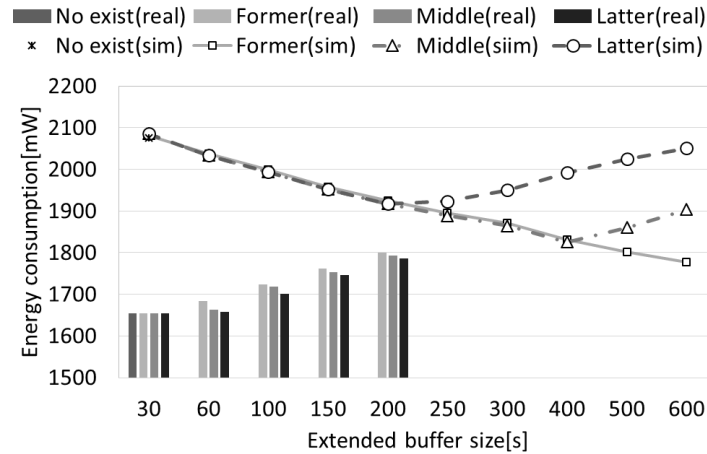
(a) ビットレート 10 Mbps の場合



(b) ビットレート 20 Mbps の場合



(c) ビットレート 30 Mbps の場合



(a) DASH 配信の場合

図 6.1.4 消費電力量評価結果

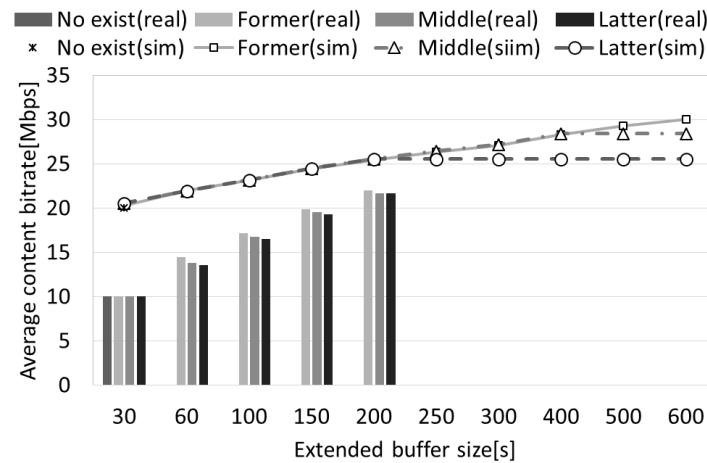


図 6.1.5 平均ビットレート評価結果

本評価に関する考察を固定レート配信時と DASH 配信時に分けて行う。

① 固定レート配信時

図 6.1.2 から、高スループットエリアで先読みするセグメント数が増大する程、滞在時間は増大することがわかる。本提案システムをより有効的に利用するためには、視聴したい映像のビットレートと先読みする映像の時間により増大する移動時間が変動するので、これらを考慮した品質の高スループットエリアを選択する必要がある。実機実験では、帯域を十分に利用した通信を想定するシミュレーションと比較して、スループットが十分に得られないため、滞在時間は長くなる。

再生中断に関して、コンテンツビットレートが 10Mbps の場合は、配信される動画のビットレートが通信品質のキャパシティ以下であるので発生しない。図 6.1.3 から、提案システムの再生中断時間抑制効果は高スループットエリアが移動の前半に近い程、また、当エ

リアで拡張したバッファ容量が大きい程、大きいことが確認される。また、バッファが枯渇する時間と高スループットエリアに到達する時間により、抑制できる再生中断時間が決定することから、高スループットエリアで拡張されるバッファ容量が同じ場合でも、シミュレーション、実機実験における4シナリオの結果が異なる。さらに、実機実験においてコンテンツビットレート 20 Mbps の映像を配信した場合、高スループットエリアで拡張するバッファ容量を 250s とした時、約 43s、30 Mbps の映像を配信した場合、高スループットエリアで拡張するバッファ容量を 200s とした時、約 80s の再生中断が抑制されることを確認した。

消費電力に関して、図 6.1.4 より、高スループットエリアで拡張されるバッファ容量が大きい程、消費電力は抑制されることがわかる。但し、高スループットエリア以降の移動時間が 200s の時に 400s 分の映像を先読みする等の、高スループットエリアにおける先読みを冗長に行うと消費電力は増大する。さらに、実機実験ではコンテンツビットレートが 10Mbps の動画を視聴する際、拡張されるバッファ容量を 400s とすると約 155mW、20Mbps の動画を視聴する際、拡張されるバッファ容量を 250s とすると約 162mW、30Mbps の動画を視聴する際、拡張されるバッファ容量を 200s とすると約 64mW の消費電力が抑制されることを確認した。シミュレーション結果と実験結果との差異は、前述の通り Wi-Fi 環境では Tail 電力が見られないこと、また通信時の電力が LTE 環境と比較して小さいことが影響していると考えられる。

② DASH 配信時

DASH 配信時のシミュレーション評価では、通常の通信速度(20Mbps)の経路上を移動している際は、20Mbps(キャパシティ=ビットレートであるので、OFF phase にならない。よって常に通信状態となる)のビットレートを選択する。一方で、実機実験評価では、20Mbps のキャパシティを設けた場合でも、実際のスループットがそれを下回るので、一つ下の 10Mbps のビットレートを選択する。但し、高スループットエリア(50Mbps)では、シミュレーション評価、実機実験評価共に最高レートである 30Mbps に対し十分なキャパシティがあるので、30Mbps のレートを選択する。

図 6.1.2 より、高スループットエリア滞在時間は、先読みするコンテンツ量が増大する程増大することがわかる。高スループットエリアで選択される映像のビットレートは 30Mbps であるので、30Mbps 固定レートの映像配信時の結果と同様の結果が得られている。

図 6.1.4 より、シミュレーション(理論)では、高スループットエリアで先読みするコンテンツ量が増大する程、消費電力は抑えられることがわかった。一方で、実機実験では、先読みするコンテンツ量が増大する程、消費電力は増大する結果となった。シミュレーション評価と実機実験評価の差異を引き起こした要因として、高スループットエリア以外で配信された映像のビットレートがシミュレーションでは 20 Mbps、実機実験では 10 Mbps と異なっていたことが挙げられる。これに対し、式(5.7.4)を用いて、シナリオ Former におい

でサーバ側に用意するコンテンツのレートを最高 30Mbps、40Mbps とし、DASH 配信した時の消費電力を算出する。但し、高スループットエリアでは、最高のビットレートを選択することを想定する。その結果を図 6.1.6 に示す。

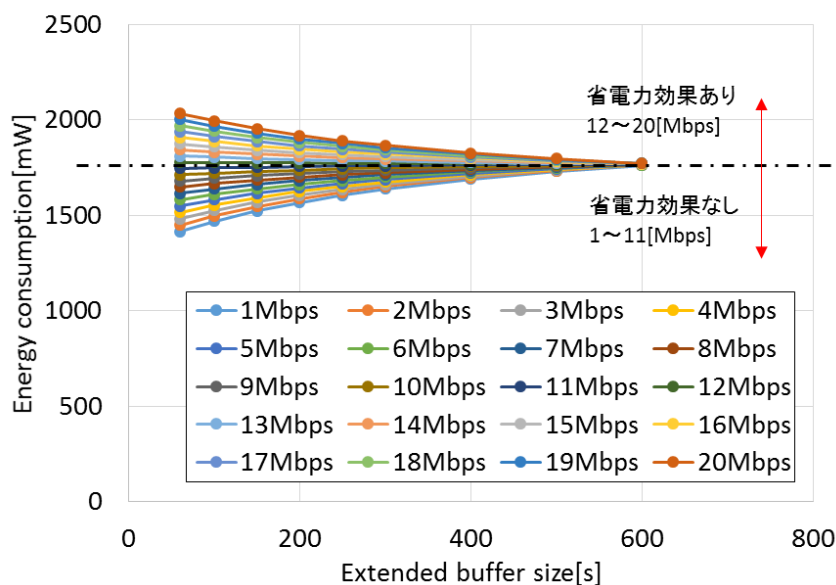


図 6.1.6(a) 最高レート 30Mbps の場合の推定消費電力

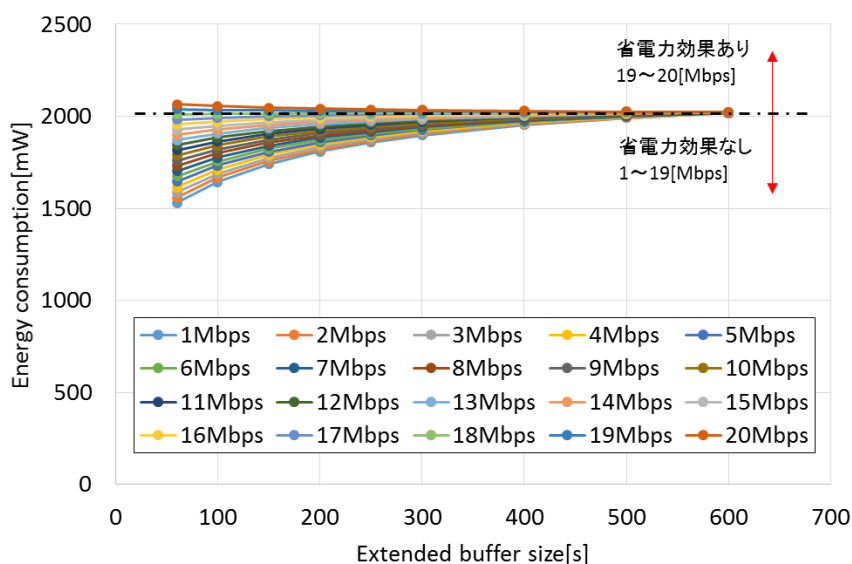


図 6.1.6(b) 最高レート 40Mbps の場合の推定消費電力

図 6.1.6(a)より、高スループットエリアにおいて選択されるビットレートが 30Mbps となる場合、高スループットエリア以外で選択されるビットレートは、12~20Mbps 以上の

値でなければ消費電力は増大してしまうことがわかる。したがってコンテンツ配信サーバ側で用意するビットレートは、高スループットエリア以外で 12Mbps 以上のものが選択されるよう用意しなければ、省電力効果は望めない。

図 6.1.6(b)も同様に、高スループットエリアにおいて選択されるビットレートが 40Mbps となる場合、高スループットエリア以外で選択されるビットレートは、19~20Mbps 以上の値でなければ消費電力は増大してしまうことがわかる。したがってコンテンツ配信サーバ側で用意するビットレートは、高スループットエリア以外で 19Mbps 以上のものが選択されるよう用意しなければ、省電力効果は望めない。

以上の結果から、今回の DASH 配信評価で、シミュレーション結果と実機実験評価により結果が異なった要因は、選択されたビットレートであることが確認された。

最後に選択される平均レートに関して、図 6.1.5 より、先読みするコンテンツ量が増大する程増大することがわかる。高スループットエリアで拡大するバッファ容量を 200s とした時、従来手法と比較して平均レートが約 12 Mbps 増大することが確認された。

以上の結果から、経路の通信速度変動と映像のビットレートを考慮し、コンテンツ先読みによる移動時間の増大を許容することにより、本提案システムは、従来の映像配信と比較して省電力加えて高信頼な映像配信を実現することが確認された。

6.2 フィールド実験

実環境における提案システムの挙動を確認するため、本稿では、第 5 章で示した手法に従い、スループット履歴の収集、無線ネットワーク品質の可視化、経路探索、バッファ制御を行った際の高スループットエリア滞在時間、再生中断時間、消費電力、選択されたビットレートの平均値を観測する。並びに、第 4 章で提案したモデル式の実環境における妥当性を本フィールド実験で観測されたスループットを有体に用いて評価する。

6.2.1 評価環境及び方法

本フィールド実験は、消費電力の計測に用いる Monsoon Power Monitor の電力供給による制約のため、2 段階に分けて行う。まず、移動経路において実際に LTE を介し映像配信を行った際のスループットを計測する。その後、観測されたスループットデータを用いて、研究室内における消費電力計測を行う。これら計測実験に対するパラメータを表 6.2.1 に示す。

まず、経路上で映像配信を行い、その時の映像セグメント受信時のスループットを計測する。図 4.3.3(a)に示すように、スマートフォン上で映像配信を行うために、コンテンツ配

信サーバを早稲田大学内に設置する。本サーバは、Ubuntu によるデスクトップ PC であり、クライアント端末は、スマートフォン端末の Galaxy S4 を用いる。また、配信する動画像として 4K 映像”Tears of Steel”を H.264./AVC により 10、20、30 Mbps に圧縮したものを
用いる。サーバ、クライアント端末間の通信は携帯電話事業者が提供する LTE を利用し、
経路上で動画配信を行った際のビデオセグメント受信時のスループットを計測する。

次に、消費電力の計測実験について記述する。本計測実験では、図 4.3.3(b)に示すような
早稲田大学内に設置した Wi-Fi 環境を用いて、疑似的に経路上で映像配信を再現し、
Monsoon Power Monitor を用いて消費電力の計測することで、経路上での映像配信時に消
費される電力の評価を行う。経路上で計測されたスループットの実測値を用いて、屋内で
経路上で映像配信をした時の状態を再現する。用いるアクセスポイントは IEEE802.11n の
規格とし、配信サーバ、クライアント端末、ビデオコンテンツはスループット計測実験と
同一のものを使用する。サーバクライアント間の無線帯域は、Linux で実装されている tc
コマンドにより実測されたスループットの値にエミュレートする。ただし、単純化のため
100s ごとにスループットを正規化している。

表 6.2.1 フィールド実験パラメータ

Parameter	Value
デフォルトのバッファ上限 (Bmax) (s)	30
デフォルトのバッファ下限 (Bmin) (s)	20
高スループットエリアで拡大するバッファの 上限 (B'max) (s)	60, 100, 150, 200, 250, 300, 400
コンテンツビットレート (Mbps)	10 DASH(10, 20, 30)
セグメント分割単位 (s)	2

6.2.2 評価シナリオ

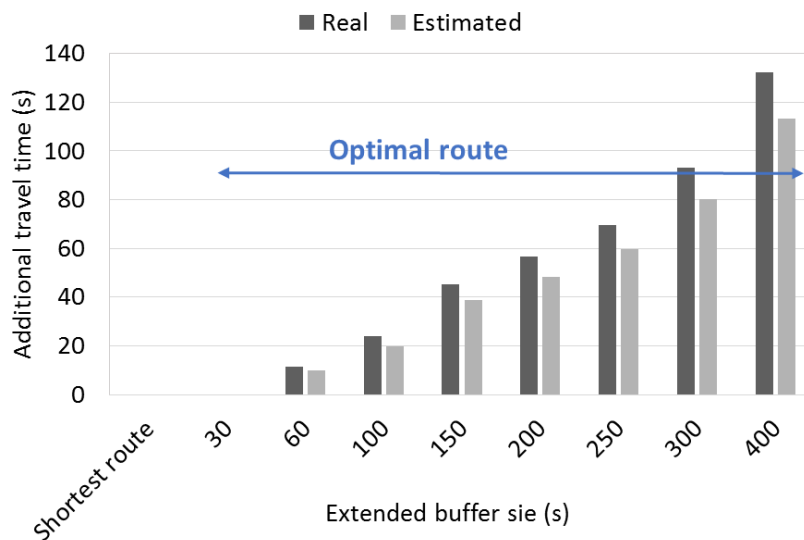
本フィールド実験は、早稲田大学理工キャンパス付近の都市である高田馬場で行う。出
発地点及び目的地点を設定し、提案システムは収集したスループット履歴により構築され
た無線ネットワーク品質マップを用いて Optimal route を導出する。これらの導出過程は
第 5 章に記載されている。また、比較対象として、Google Map により提案された Shortest
route を用いる。本実験の対象経路である Optimal route 及び Shortest route は、図 5.5.4
に示されている。

Shortest route 上では、DASH-JS のデフォルトのバッファ制御である long ON-OFF
cycle を常に行う。一方で、Optimal route 上では高スループットエリアにおいて、固定レ

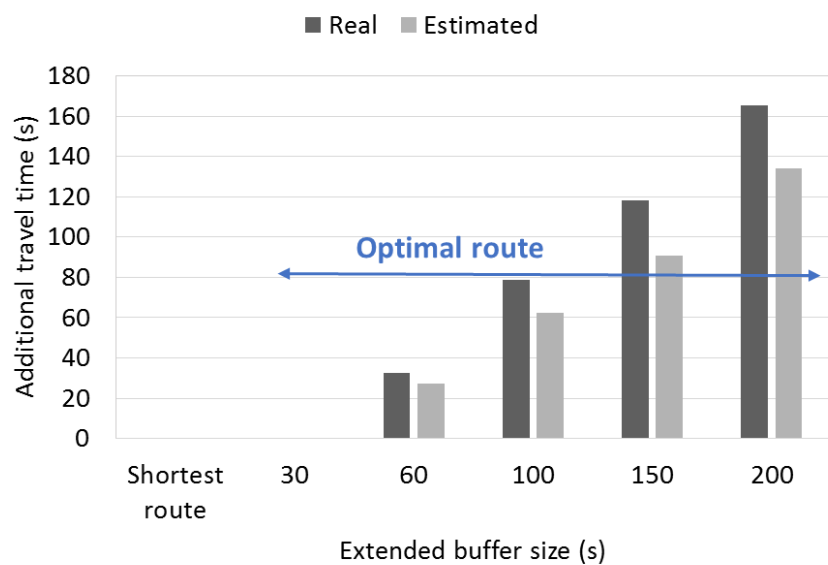
ート 10 Mbps の映像配信時最大 400 s、DASH 配信時最大 200 s バッファ容量を拡大する。高スループットエリア以外では、Shortest route 同様、DASH-JS のデフォルトのバッファ制御である long ON-OFF cycle を繰り返す。

6.2.3 評価結果

図 6.2.1(a)(b)に固定レート及び DASH 配信時の高スループットエリア滞在時間、図 6.1.2(a)(b)に固定レート及び DASH 配信時の消費電力、図 6.1.3 に DASH 配信時の平均ビットレートを示す。但し、前述の通り、DASH-JS の制約により高スループットエリアにおいて拡大されるバッファ容量はコンテンツビットレートが 10Mbps の時、最大 400s まで、DASH 配信の時、最大 200s までの計測とする。また、今回は、用意された映像のコンテンツビットレートがキャパシティ以下となる場合が多かったため再生中断は発生していない。

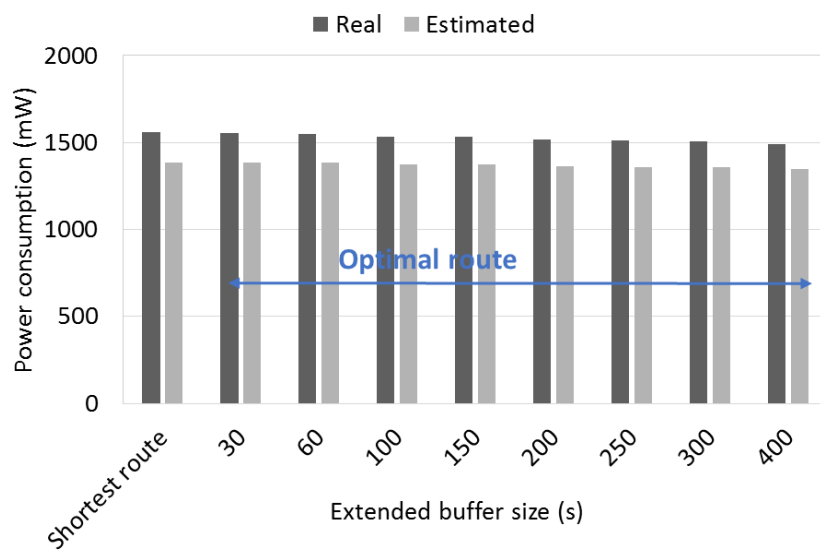


(a) ビットレート 10 Mbps の場合

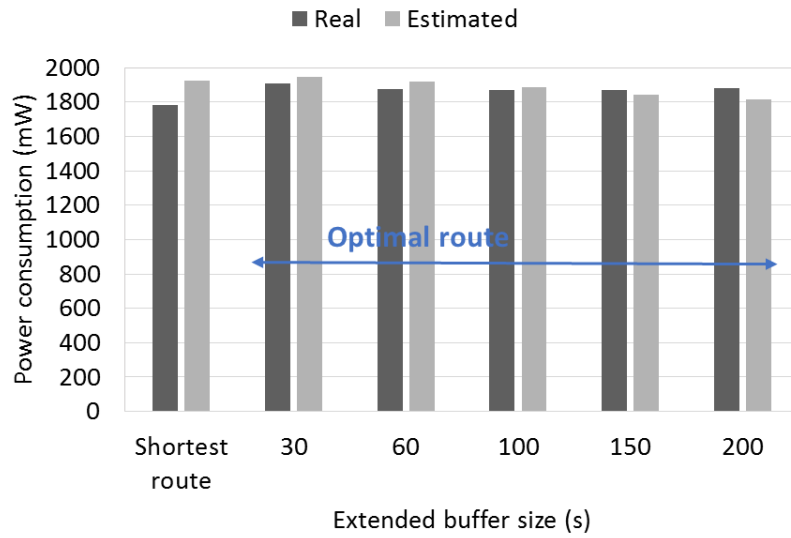


(b) DASH 配信の場合

図 6.2.1 高スループットエリア滞在時間評価結果



(a) ビットレート 10 Mbps の場合



(b) DASH 配信の場合

図 6.2.2 消費電力評価結果

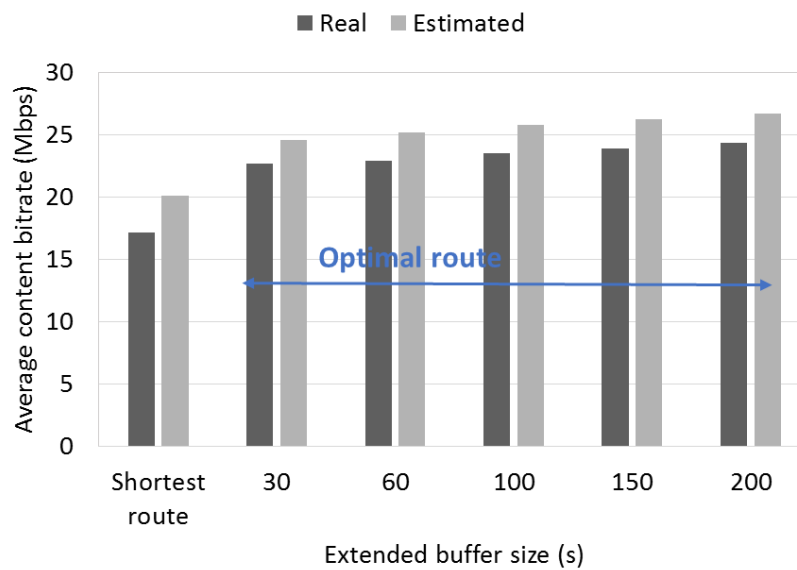


図 6.2.3 DASH 配信における平均ビットレート評価結果

本評価に関する考察を固定レート配信時と DASH 配信時に分けて行う。

① 固定レート配信時

図 6.2.1 より、シミュレーション・研究室内実験と同様、高スループットエリアで先読みするセグメント数が増大する程、高スループットエリア滞在時間つまり移動時間は増大することがわかる。

図 6.2.2 より、高スループットエリアで拡張するバッファサイズを増大させる程、消費電力が抑えられることが確認された。本実験において、高スループットエリアで拡張するバッファ容量が 400 s の時、消費電力を 62 mW 抑制することが実現できている。

② DASH 配信時

図 6.2.1 より、シミュレーション・研究室内実験と同様、高スループットエリアで先読みするセグメント数が増大する程、高スループットエリア滞在時間つまり移動時間は増大することがわかる。

図 6.2.2 より、高スループットエリアで拡張するバッファサイズの上限が 200 s の場合のみ消費電力が増大し、その他のバッファサイズの場合は消費電力が抑えられることが確認された。これは、200 s の実験時に観測されたスループットが小さかったことが原因として考えられる。DASH 配信時、提案システムを使用した際の消費電力は、スループット、ビットレートに依存し、変動することが確認された。本実験において、高スループットエリアで拡張するバッファ容量が 150 s の時、消費電力を 42 mW 抑制することが実現できている。

更に、図 6.2.3 より移動時間の増加を許容することにより、平均ビットレートが向上することが確認された。本実験において、高スループットエリアで拡張するバッファ容量が 200 s の時、平均ビットレートを 7.2 Mbps 向上することが実現できている。

また、図 6.2.1 から図 6.2.3 の実測値とモデルによる推定値の比較をした結果、固定レート配信時、高スループットエリア滞在時間は約 11%、消費電力は約 10%の誤差となることがわかる。さらに、DASH 配信時、高スループットエリア滞在時間は約 3%、消費電力は約 11%、平均レートは約 11%の誤差となることがわかる。第 4 章における評価結果と合わせて、提案した消費電力推定モデルにおける推定値の平均誤差率は約 11%となることが確認された。

第7章 総括

7.1 まとめ

本論文では、モバイルユーザの行う映像配信の省電力化加えて高信頼化を目的とした 2 つの提案をした。まず、1 つ目の提案として消費電力推定モデルの構築を行った。評価実験により、提案モデルから導出される消費電力の推定値の平均誤差率は、約 11%となることを確認した。さらに本モデルにスループット予測を用いることで、将来の消費電力の推定をする応用例を示した。

次に 2 つ目として、目的地まで移動するユーザに対し、移動経路の提示及びバッファ制御を行うことで、省電力加えて高信頼な映像配信を実現するシステムを提案した。シミュレーション及び実機実験を通して、本システムの映像配信特性評価を行った結果、本システムでは、固定レート配信時、再生中断時間の低減及び消費電力の抑制が実現されることを確認した。また、DASH 配信時においても、コンテンツ配信サーバに通信速度変動を考慮したマルチビットレートの映像を用意することにより省電力な映像配信が実現できることを確認した。

7.2 今後の展望

本論文で提案された省電力加えて高信頼な映像配信を実現するシステムにおいて、映像配信をする際に過去に観測されたスループットと同等の通信品質が再現されることを前提とした経路探索、バッファ制御が行われている。しかし、無線通信品質は、周辺に存在するユーザや天気だけでなく、各携帯電話事業者の迅速なエリア品質対応などにより、常に変化し続けているため、期待されるスループットが得られるとは限らない。そこで、同じく本論文で提案された推定値の導出のみに留まっている消費電力推定モデルとスループット予測技術を活用し、将来の再生中断や消費電力の予測を行いながらリアルタイムに経路探索、バッファ制御を行うといった更なるシステムの拡張が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、日頃から様々のご指導をして頂きました甲藤二郎教授に心より感謝の意を表します。また、研究のみならず様々なアドバイスを頂いた金井謙治先輩をはじめとするネットワーク班の先輩方や名古屋大学の村瀬勉教授、さらに、インターンシップ、アルバイトの形で関わらせて頂いた日本電気株式会社や構造計画研究所の皆様に深く御礼申し上げます。

最後に、ここまで育ててくださった両親に深く感謝いたします。

2017 年 1 月 30 日

竹中 幸子

参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015–2020 White Paper[online]:
http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html.
- [2] YouTube [online]: <http://www.youtube.com/>.
- [3] Netflix [online]: <http://www.netflix.com/>.
- [4] Hulu [online]: <http://www.hulu.jp/>.
- [5] スマートフォンへの不満 [online]:
<http://wakuwakumobile.com/sumahofumannranking/>.
- [6] Google glass. [online]: <https://developers.google.com/glass/>.
- [7] J. Sommers, P. Barford: Cell vs. WiFi: On the performance of metro area mobile connections, Proc. ACM IMC'12, pp.301-314, Nov. 2012.
- [8] K. Kanai, J. Katto and T. Murase: Performance Evaluations of Comfort Route Navigation Providing High-QoS Communication for Mobile Users, ITE Trans. on Media Tech. and App., Vol.2, No.4, Oct. 2014.
- [9] K. Satoda, H. Yoshida, H. Ito, and K. Ozawa: Adaptive video pacing method based on the prediction of stochastic TCP throughput, Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE, pp1944-1950, Dec.2012.
- [10] 木村拓人, 横田将裕, 松本存史, 林孝典: 過去のスループット情報を利用した動画ページング制御法の提案, 信学技報 CQ 研究会, Mar.2016.
- [11] M. A. Hoque, M. Siekkinen, J. K. Nurminen: Energy efficient multimedia streaming to mobile devices –a survey, IEEE Comms. Survey & Tutorials, Vol.16, Issue 1, pp.579-597, Feb.2014.
- [12] R. Trestian, A. N. Moldovan, O. Ormond, and G. M. Muntean: Energy consumption analysis of video streaming to Android mobile devices, IEEE NOMS 2012, pp.444–452, Apr.2012.
- [13] Y. Xiao, R. S. Kalyanaraman and A. Y. Jaaski: Energy consumption of mobile YouTube: quantitative measurement and analysis, in Proc. NGMAST, pp.61-69, Sep.2008.
- [14] M. Anand, E. B. Nightingale, and J. Flinn: Self-tuning wireless network power management, Journal Wireless Networks, Vol.11, Issue 4, pp.451-469, Jul.2005.
- [15] D. Bertozzi, L. Benni and B. Ricco: Power aware network interface management for streaming multimedia, IEEE WCNC2002, pp.926-930, Mar. 2002.

- [16] S. Chandra: Wireless network interface energy consumption Implications for popular streaming formats, Multimedia Systems, Vol.9, Issue 2, pp.185-201, Aug. 2003.
- [17] Y. Ishizu, K. Kanai, J. Katto, H. Nakazato, and M. Hirose: Energy-efficient video streaming over named data networking using interest aggregation and playout buffer control, IEEE Greencom 2015, pp.318–324, Dec.2015.
- [18] 服部武, 藤岡雅宣: ワイヤレス・ブロードバンド HPSA+/LTE/SAE 教科書, インプレス R&D, 2010.
- [19] 前原文明, ネットワーク制御と管理 講義資料: 第4回_NW.pdf, 2013.
- [20] 高畑文雄, ワイヤレス通信ネットワーク 講義資料: II-2 節.pdf, 2014.
- [21] サービス開始まで1年に迫ったLTEって何? [online]:
<http://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/0910/21/news115.html>.
- [22] LTE ネットワークの動作 [online]:
<http://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/1012/24/news125.html>.
- [23] J. Huang, F. Qian, A. Gerber, Z. M. Mao, S. Sen, and O. Spatscheck: A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks, Proc. ACM MobiSys'12, pp.225-238, Jun. 2012.
- [24] 無線 LAN(Wi-Fi)の規格「IEEE 802.11a/b/g/n/ac」の最大伝送速度まとめ [online]:
<http://128bit.blog41.fc2.com/blog-entry-370.html>.
- [25] Wireless LAN - 802.11b / 11a / 11g / 11n [online]:
<http://www.infraexpert.com/study/wireless2.html>.
- [26] 802.11ac [online]:
<http://www.infraexpert.com/study/wireless49.html>.
- [27] 守倉正博, 久保田周治: 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス R&D, 2008.
- [28] 5G のサービスと要求条件～5G の要求条件[online]:
<https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/tech/5g/5g01/02/02.html>.
- [29] ドコモとしての5Gの定義とコンセプト [online]:
<https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/tech/5g/5g01/03/index.html#notice12>.
- [30] 5G の標準化戦略～段階的な標準化アプローチ[online]:
<https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/tech/5g/5g01/04/index.html>.
- [31] 無線 LAN 関連国際標準化の動向[online]:
<http://iwparchives.jp/files/pdf/iwp2015/iwp2015-ch05-03-p250.pdf>.
- [32] WirelessWire News オフロード[online]:
<https://wirelesswire.jp/special/201112/01/article/11.html>.
- [33] 甲藤二郎, ネットワーク制御と管理 講義資料: 5.Network-CDN&Application, 2013.

- [34] 竹下隆, 村山公保, 荒井透, 荻田幸雄: マスタリング TCP/IP, オーム社, 2012.
- [35] HTTP と専用プロトコルを用いたストリーミング[online]:
https://www.jpo.go.jp/shiryou/s_sonota/hyoujun_gijutsu/bidirectional_video/142_6.htm.
- [36] Sodagar: The MPEG-DASH Standard for Multimedia Streaming Over the Internet, IEEE Multimedia, vol. 18, no.4, pp. 62-67, Oct. 2011.
- [37] ITEC DASH-JS. [online]:
http://www-itec.uni-klu.ac.at/dash/?page_id=746.
- [38] A. Rao, A. Legout, Y. S. Lim, D. Towsley, C. Barakat, W. Dabbous: Network characteristics of video streaming traffic, Proc. ACM CoNEXT 2011, Dec. 2011.
- [39] K.J.Ma, et al: Scalability of HTTP Pacing with Intelligent Bursting, Proc. IEEE ICME 2009, pp.798-801, June 2009.
- [40] 石津裕也, 金井謙治, 甲藤二郎, 中里秀則, 広瀬真里枝: NDN 上のビデオ配信におけるバッファリング戦略に基づく電力モデル提案と省電力化への検討, 信学技報 NS 研究会, Mar.2016.
- [41] 吉田裕志, 里田浩三, 野垣智士: TCP スループットの確率的拡散予測に基づく映像配信制御, IC2011, p57-65, 2011.
- [42] Monsoon Power Monitor [online]:
<http://www.msoon.com/LabEquipment/PowerMonitor/>.
- [43] 石津裕也: NDN 上のビデオ配信における再生バッファ制御に基づく電力モデル提案と省電力化への検討, 平成 27 年度修士論文.
- [44] Xiph.org Test Media [online]:<http://media.xiph.org/>.
- [45] 歩く速度と健康について[online]: <http://aganism.com/health/hokou-speed-runtastic/>.
- [46] Google Maps [online]: <https://www.google.co.jp/maps>.

発表文献リスト

- [1] 原田臨太郎, 黒川沙代, 竹中幸子, 武藤健史, 金井謙治, 甲藤二郎: 4K 映像を用いた移動無線ネットワーク上での DASH 配信評価, 映像情報メディア学会年次大会, Sep.2014.
- [2] 竹中幸子, 原田臨太郎, 黒川沙代, 武藤健史, 金井謙治, 甲藤二郎: 4K 映像を用いた移動無線ネットワーク上での DASH 配信評価, 電子情報通信学会 NS 研究会, Nov.2014.
- [3] 金井謙治, 竹中幸子, 甲藤二郎, 村瀬 勉: 移動端末を対象とした快適経路のコンテンツ先回り配信およびオフローディングシステムへの応用, 電子情報通信学会 CQ 研究会, Nov.2014 (奨励講演).
- [4] 竹中幸子, 金井謙治, 甲藤二郎: 実環境における無線ネットワーク品質可視化の一検討, 電子情報通信学会 ICM 研究会, Jul.2015.
- [5] Bo Wei, Kenji Kanai, Sakiko Takenaka and Jiro Katto: Throughput prediction based on stochastic model of mobile network, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, Sep.2015.
- [6] Sakiko Takenaka, Kenji Kanai and Jiro Katto: QoS Improvement of Mobile 4K Video by Using Radio Quality Map, IEEE GCCE 2015, Oct.2015.
- [7] Ayano Ohnishi, Yoshimi Fujii, Fumiko Ohori, Jiro Katto, Rintaro Harada and Sakiko Takenaka: Measurement Studies of Communication Quality between UAV and Ground Station using 802.11 Wireless Channels, IEICE SmartCom 2015, Nov.2015.
- [8] 竹中幸子, 金井謙治, 野辺誠, 甲藤二郎: 映像配信における高スループットと省電力を実現するスマート経路ナビゲーションの特性評価, 情報処理学会 AVM 研究会, Dec.2015.
- [9] 青木大樹, 竹中幸子, 金井謙二, 甲藤二郎, 中里秀則: Energy Consumption Evaluation of ICN Toward Power-Saving Video Delivery, 情報処理学会 AVM 研究会, Dec.2015.
- [10] 竹中 幸子, 金井 謙治, 野辺 誠, 甲藤 二郎: 高 QoS かつ QoE を実現するスマートな移動経路上における映像配信特性評価, 映像情報メディア学会冬季大会, Dec.2015.
- [11] Daiki Aoki, Sakiko Takenaka, Kenji Kanai, Jiro Katto, Hidenori Nakazato and Marie Hirose: Energy Consumption Evaluation of ICN Toward PowerSaving Video Delivery, IEEE GreenCom 2015, Dec.2015.
- [12] 青木大樹, 竹中幸子, 金井謙治, 甲藤二郎, 中里秀則, 広瀬真里枝: ICNを想定したネットワーク消費電力量評価, 電子情報通信学会, NS 研究会, Mar.2016.
- [13] 竹中 幸子, 小倉 一峰, 山崎 康広, 本吉 彦, 甲藤 二郎: モビリティパターンの違いに

- よる Opportunistic ネットワークでの協調型情報共有方式の評価, 電子情報通信学会 CQ 研究会, Mar.2016.
- [14] 竹中幸子, 石津裕也, 金井謙治, 甲藤二郎, 村瀬勉: 高スループット転送及びバッファリング戦略を活用した移動端末における映像配信省電力化に向けた検討, 電子情報通信学会 CQ 研究会, Mar.2016.
- [15] 金井謙治, 竹中幸子, 甲藤二郎, 村瀬 勉: 複数ユーザ間において無線リソースを有効活用するスマート経路の特性評価, 電子情報通信学会 CQ 研究会, Mar.2016.
- [16] 竹中幸子, 金井謙治, 甲藤二郎, 村瀬 勉: スループット履歴に基づく高信頼且つ省電力映像配信を実現するバッファ制御, 電子情報通信学会 ICM 研究会, July.2016 (奨励講演).
- [17] Sakiko Takenaka, Kenji Kanai, Jiro Katto and Tutomu Murase: Green Video Delivery System using Moving Route Navigation and Playout Buffer Control, IEEE CCNC 2017, Jan.2017.
- [18] 竹中幸子, 金井謙治, 甲藤二郎, 村瀬 勉: 動的な通信速度変動を考慮した省電力配信のための消費電力推定モデルの特性評価, 電子情報通信学会 ICM 研究会, Mar.2017 (奨励講演) .(予定)